

Vývoj a experimentální studium elektricky vodivých sklolaminátů

Bc. Jakub Diviš

Diplomová práce
2014



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jakub Diviš**
Osobní číslo: **T13776**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Řízení jakosti**
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Vývoj a experimentální studium elektricky vodivých sklolaminátů**

Zásady pro vypracování:

- 1) Vypracování rešerše k dané problematice
- 2) Návrh a výroba elektrovodivých kompozitů, příprava zkušebních těles
- 3) Experimentální zjištění elektrických a mechanických vlastností
- 4) Vyhodnocení experimentálních výsledků a doporučení pro praktické aplikace

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího diplomové práce.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Milan Žaludek, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **10. února 2014**

Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2014**

Ve Zlíně dne 10. února 2014


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: JAKUB DIVIS

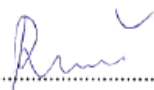
Obor: PÍŽENÍ JAKOSTI

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považuji se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně ..2.5.2014



¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělčně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) *Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlázení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.*

(3) *Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.*

⁴⁾ *zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:*

(3) *Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).*

⁵⁾ *zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:*

(1) *Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Opírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.*

(2) *Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užit či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.*

(3) *Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jim dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihledne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.*

ABSTRAKT

Práce se bude zabývat vývojem a experimentální studií elektricky vodivých kompozitů. V teoretické části se seznámíme s problematikou kompozitů, jak seznámení co kompozity jsou, tak jejich výroba, přípravou výroby, problémy výroby tak i s materiály. Dále pak budou v teoretické části probrány vlastnosti polymerních kompozitů a jejich elektrická vodivost. V části praktické budu zkoumat elektrické a částečně mechanické vlastnosti elektrovodivých kompozitů v závislosti materiálů na koncentraci plniva.

Klíčová slova: kompozit, vodivost, vlákno

ABSTRACT

The work will address the development and experimental studies of the electrically conductive composites. In the theoretical section it introduces the issue of composites, their production, production planning, production, problems and the applied materials. In the next, they will be discussed, in the theoretical section the properties of polymer composites and their electrical conductivity. In the practical part I will examine some electrical and mechanical properties of electro-conductive composite materials depending on concentrations of filler.

Keywords: composite, conductivity, thread

Za odbornou konzultaci a pomoc při realizaci bych rád poděkoval všem lidem, kteří mi svoji ochotou a pomocí pomohli s vypracováním mé diplomové práce. Zvláště bych rád poděkoval svému vedoucímu Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D a doc. Ing. Soně Rusnákové, Ph.D za odbornou konzultaci a pomoc při řešení.

Překážky se stavějí do cesty obyčejným lidem proto, aby z nich udělali neobyčejné.

Prohlašuji, že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 KOMPOZITY	13
1.1 KOMPOZITY V DĚJINÁCH	13
1.2 ROZDĚLENÍ KOMPOZITŮ	14
1.3 MATRICE (POJIVO) KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	14
1.4 PLNIVA (VÝZTUŽE) KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	15
1.4.1 Částicové výztuže.....	16
1.4.2 Vlákňové výztuže	16
2 POSTUP VÝROBY KOMPOZITŮ	19
2.1 STRÍKÁNÍ.....	19
2.2 VYSOKOTLAKÉ VSTRÍKOVÁNÍ (RTM).....	20
2.3 VAKUOVÁ INFUZE (VFI).....	20
2.4 PULTRUZE	21
2.5 RUČNÍ KLADENÍ.....	22
3 ELEKTRICKÁ VODIVOST	24
3.1 MĚŘENÍ ELEKTRICKÉ VODIVOSTI	28
4 ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI POLYMERNÍCH KOMPOZITŮ	29
4.1 ELEKTRICKY VODIVÉ POLYMERY	29
4.2 ELEKTRICKY VODIVÉ KOMPOZITY	30
4.3 VLIV SILOVÉHO POLE NA CHOVÁNÍ POLYMERŮ	32
4.4 ELEKTRICKÁ PEVNOST POLYMERŮ.....	33
4.5 DIELEKTRICKÉ VLASTNOSTI POLYMERŮ.....	33
4.6 PRINCIP VODIVOSTI INTRIZITNĚ VODIVÝCH POLYMERŮ.....	37
4.6.1 Chemická vazba a konjugace	37
4.6.2 Transport náboje.....	38
4.6.3 Dopování polymerů.....	39
4.6.4 Stabilita konjugovaných polymerů.....	40
4.7 ZÁSTUPCI KONJUGOVANÝCH POLYMERŮ	40
4.8 OBLASTI VYUŽITÍ VODIVÝCH POLYMERŮ	41
4.9 PERKOLAČNÍ TEORIE.....	42
4.9.1 Oblast pod perkolačním prahem	43
4.9.2 Oblast perkolačního prahu	43
4.9.3 Oblast nad perkolačním prahem.....	44
4.10 DIELEKTRIKA.....	44
4.10.1 Polarizace dielektrika	44

4.10.2	Nepolární dielektrikum	45
4.10.3	Polární dielektrikum.....	46
4.10.4	Heterogenní dielektrikum.....	47
II	PRAKTICKÁ ČÁST	48
5	CÍL LABORATORNÍCH ZKOUŠEK.....	49
6	VÝROBA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ.....	50
6.1	MATERIÁLY.....	50
6.1.1	Materiály výztuže	50
6.1.2	Epoxidová pryskyřice L 285 (MGS)	50
6.1.3	Ostatní použité přísady.....	51
6.1.4	Plniva kompozitů	51
6.2	PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ	52
6.2.1	Pomůcky pro výrobu zkušebních vzorků	52
6.2.2	Příprava formy (skleněné desky) pro nanesení tkaniny.....	52
6.2.3	Příprava tkaniny	53
6.2.4	Příprava plniva	53
6.2.5	Příprava matrice	54
6.2.6	Ruční laminace.....	54
6.2.7	Výroba měřících tělísek.....	55
7	ZKOUŠKY ELEKTRICKÉ VODIVOSTI	56
7.1	MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJ NOVOCONTROL CONCEPT 90.....	57
8	ZKOUŠKA RÁZEM	58
9	ZKOUŠKA OHYBEM.....	59
10	VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY ELEKTRICKÉ VODIVOSTI	60
10.1	BEZ PŘÍRAD	60
10.2	UHLÍKOVÉ VLÁKNA	62
10.3	AS WOPLÉ	64
10.4	GRAFIT	66
10.5	GRAFIT_1	68
10.6	ZÁVĚREČNÉ VYHODNOCENÍ.....	71
11	VYHODNOCENÍ MECHANICKÉ ZKOUŠKY – ZKOUŠKA RÁZEM (CHARPYHO KLADIVO)	73

11.1	BEZ PŘÍRAD	74
11.2	UHLÍKOVÁ VLÁKNA 5%	74
11.3	UHLÍKOVÁ VLÁKNA 10%	74
11.4	AS 5%	75
11.5	AS 10%	75
11.6	GRAFIT 5%	75
11.7	GRAFIT 10%	76
11.8	GRAFIT_1 5%	76
11.9	GRAFIT_1 10%	76
11.10	GRAFIT_1 15%	77
11.11	GRAFIT_1 20%	77
11.12	ZÁVĚREČNÉ VYHODNOCENÍ.....	78
12	VYHODNOCENÍ MECHANICKÉ ZKOUŠKY – ZKOUŠKA OHYBEM.....	80
12.1	BEZ PŘÍRAD	81
12.2	UHLÍKOVÁ VLÁKNA 5%	82
12.3	UHLÍKOVÁ VLÁKNA 10%	83
12.4	AS WOPLÉ QUARTZ 5%	84
12.5	AS WOPLÉ QUARTZ 10%	85
12.6	GRAFIT 5%	86
12.7	GRAFIT 10%	87
12.8	GRAFIT_1 5%	88
12.9	GRAFIT_1 10%	89
12.10	GRAFIT_1 15%	90
12.11	GRAFIT_1 20%	91
12.12	ZÁVĚREČNÉ VYHODNOCENÍ.....	92
	12.12.1 Uhlíkové vlákno	94
	12.12.2 AS Woplé Quartz	95
	12.12.3 Grafit	95
	12.12.4 Grafit_1	96
13	ZÁVĚR.....	97
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	99
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	102
	SEZNAM OBRÁZKŮ	105
	SEZNAM TABULEK.....	108
	SEZNAM PŘÍLOH.....	110

ÚVOD

Rozvoj kompozitních materiálů je velmi rozšířený po celém světě. Materiály z kompozitů jsou uplatňovány v mnoha průmyslových odvětvích od leteckého po automobilový průmysl. Ve většině nahrazují drahé nebo špatně dostupné průvodní materiály a jsou jimi nahrazeny ve stejné, či i v lepší kvalitě. V kompozitních materiálech je velká budoucnost, poněvadž snižují energetickou spotřebu při výrobě, jsou lehčí a zároveň jsou velmi pevné a tuhé. Mechanické vlastnosti kompozitních materiálů stoupají až do 80% podílu se zvyšujícím se obsahem výztužných složek.

Kompozitní materiály byly používány člověkem již v dávných dobách. Lidé používali materiály např. pro stavbu domu na použití cihel, kde se se použil jíl jako matrice a sláma jako plnivo. Od 20. století se kompozitním materiálům věnovala větší pozornost hlavně v leteckém a kosmickém průmyslu, odkud pak kompozitní materiály začali pronikat do civilních oblastí.

Hlavní náplní této diplomové práce je probrání dané problematiky v oblasti kompozitů. Hlavním tématem je zjištění elektrické vodivosti daných kompozitů, jak se mění jejich elektrická vodivost v závislosti na změně plniva a na změně množství plniva. Dále pak vyhodnocení mechanických vlastností, jak zkoušky rázem, tak zkoušky ohybem.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KOMPOZITY

Kompozity jsou heterogenní systémy tvořené minimálně dvěma fázemi, obvykle rozdílného chemického složení. Liší se od sebe jak chemickými tak fyzikálními vlastnostmi. Spojitá složka, která je obvykle poddajnější se nazývá matrice (pojivo) a tvrdší, tužší a pevnější složka se nazývá plnivo (výztuž). Kompozity mohou být tvořeny z nejrůznějších kombinací materiálů. Při kombinaci dvou a více složek dochází k propojování vlastností obou materiálů. [1]

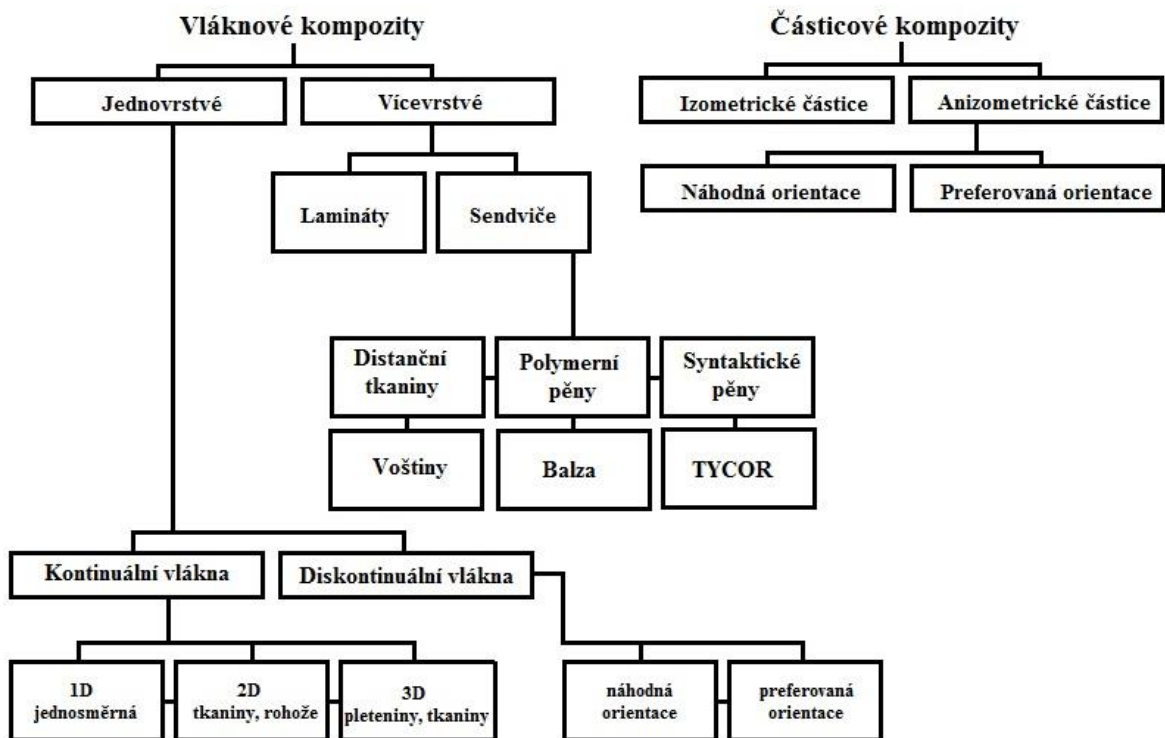
Nejdůležitější předností kompozitů je tzv. synergismus, což znamená, že vlastnosti kompozitu jsou vyšší, než odpovídalo pouhému průměrnému sečtená vlastností jednotlivých složek. Existence synergismu je velmi významná, neboť vede k získávání materiálů zcela nových vlastností. [15]

Mezi výhody kompozitů patří hlavně úspora hmotnosti, tudíž i snadná manipulace s nimi. Dalších z důležitých vlastností kompozitů patří vysoká pevnost v porovnání s vlastností a hmotností. Dále pak nepodléhají korozi. Kompozitní materiály se vyznačují odlišnými mechanickými vlastnostmi pro různé směry zatížení. Tuto vlastnost nazýváme anizotropie. Jednosměrně orientované plnivo se používá pro zatížení v jednom směru, naopak pro složitější zatížení se používá více vrstev různě orientované výztuže. Kompozity mají dvě velké nevýhody a těmi jsou nedostatečné protažení a vysoká cena. [2]

1.1 Kompozity v dějinách

Kompozity se používaly nejméně 3 000 let před Kristem starými Babyloňany. Používali se kompozity založené na vyztužených přírodních pryskyřicích a živcích. Natož staří Egypťané používali kompozity na stavbu člunů ze stvolu papyru uložených v živičné matici. [24]

1.2 Rozdělení kompozitů



Obr. 1 Rozdělení kompozitů [25]

1.3 Matrice (pojivo) kompozitních materiálů

Hlavní náplní matrice v kompozitním profilu je spojovat výztuže dohromady, chránit výztuž před chemickým nebo mechanickým poškozením, umožnit přenos vnějších napětí do výztuže a udržovat ji v požadovaném směru vůči namáhání.

Druh matrice určuje také další vlastnosti: elektro-izolační vlastnosti, odolnost proti korozi, odolnost proti teplotě atd. [2]

Podle matrice dělíme kompozity do pěti skupin:

- S kovovou maticí (metal matrix composites – MMCs),
- S polymerní maticí (polymer matrix composites PMCs),
- S keramickou maticí (ceramic matrix composites – CMCs),
- Se skleněnou maticí,
- S uhlíkovou maticí

Z hlediska klasifikace polymerních matric existují dva základní typy pojiv a tím jsou reaktoplasty a termoplasty.

Reaktoplasty, kterými jsou např. epoxidy, nenasycené polyestery či fenol formaldehyd, jsou obvykle dodávány ve formě viskózních tekutin s konzistencí řídkého medu tvořené relativně malými molekulami, které jsou vytvrzeny chemickou reakcí po dodání katalyzátoru a iniciátoru. Vytvrzení probíhá za pokojové teploty, nebo za zvýšené teploty. Vytvrzený reaktoplast zůstává v tuhé fázi i po zahřátí. To zvyšuje jeho odolnost proti vysokým teplotám. Naopak na druhé straně zvyšuje i jeho křehkost a omezuje recyklovatelnost.

Termoplasty, kterými jsou např. polyetylén tetraftalát (PET), polypropylen (PP), polystyren (PS) a další. To jsou tuhé látky, které měknou a tečou při zvýšení teploty a při ochlazení přejdou do pevného skupenství. [3]

1.4 Plniva (výztuže) kompozitních materiálů

Hlavní náplní plniv (výztuže) v kompozitním materiálu je zajištění mechanické vlastnosti materiálu, především pevnost a tuhost. Avšak i elektrické vlastnosti závisejí na výztuži a proto typ výztuže má klíčový vliv na vlastnosti profilu.[16]

Podle geometrického tvaru výztuže dělíme kompozity následujícím způsobem

- Částicové
- Vlákenné [3]



Obr. 2 Typy plniva dle geometrických tvarů [4]

1.4.1 Částicové výztuže

Částice jsou vyráběna průmyslově a to chemickou změnou z přírodních zdrojů. Nebo jsou minerálního původu a zpracovávají se průmyslově mechanickým mletím na velikost a tvar. Na druhu výrobního procesu závisí tvar a velikost částice.

Částicové výztuže se dělí na izometrické a anizometrické:

- Izometrické – mají tvar koule nebo elipsoidu
- Anizometrické – mají tvar destiček nebo jehlic

Zvýšením tuhosti a zlepšením tvarové stálosti se dosahuje použitím anorganických částí. Pro zlepšení houževnatosti slouží elastomerní částice. Částice grafitu a sulfidu zvyšují odolnost proti otěru a tím i kluzné vlastnosti. [5]

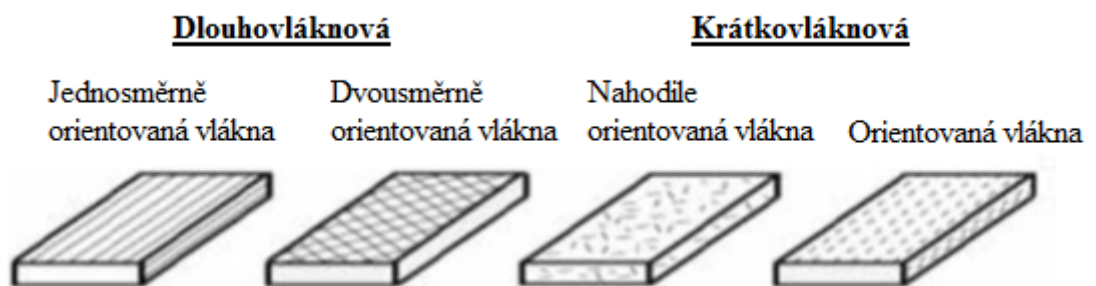
1.4.2 Vlákenné výztuže

U vláknových výztuží je jeden rozměr výrazně větší, než dva zbývající. Vlákna výztuže rozhodují o tvarové, ohybové a tahové pevnosti kompozitu. Toto vše ovlivňuje materiál vláken, množství obsažené v matici a jejich orientaci. Orientací vláken lze optimalizovat pevnost a tuhost, odolnost proti teplotě, únavě a vlhkosti. Tuhost a pevnost materiálu

se mění podle směru uložení vláken. Nejvyšší pevnost dosáhneme, pokud jsou vlákna ve směru, naopak horší pevnosti dosáhneme, pokud jsou vlákna mimo jejich orientaci.

Vláknové výztuže mohou být dlouhé a krátké nepřerušené podél celého výrobku. Vlákna jsou uspořádána:

- V jednom směru
- Ve dvou směrech
- Chaoticky



Obr. 3 Dělení výztuže vláken [5]

Sdružením elementárních vláken vzniknou prameny, které se dále zpracovávají na polotovary:

- Sekané prameny
- Prameny bez zákrutů
- Mletá vlákna
- Jednoduchá a kabelová příze
- Tkaniny, rohože
- Rovingy

Nejvíce se používají rovingy a tkaniny. Rovingy jsou na cívkách. Mají buď vnitřní nebo vnější odtah, nebo jsou ve formě pásek o určité šířce obsahující vlákna v podélné orientaci.

Tkaniny mají různou textilní vazbu. Důležitá je u tkanin i tvarová členitost. Vzájemné uspořádání osnovy a útku vytváří tři základní typy vazeb:

- Keprová vazba
- Plátnová
- Atlasová



Obr. 4 Základní typy tkaní [26]

Druh materiálu vláken lze v tkaninách navzájem kombinovat i s jinými druhy výztužných vláken. Tyto tkaniny se nazývají hybridní.

Dle materiálu se vláknové výztuže dělí:

- Skleněná vlákna
- Polymerní vlákna
- Bórová vlákna
- Keramická vlákna
- Přírodní vlákna
- Kovová vlákna
- Čedičová vlákna
- Uhlíková vlákna

2 POSTUP VÝROBY KOMPOZITŮ

Tak jako všechny výrobky, tak jsou i výrobky z kompozitních materiálů dané nějakým technologickým postupem výroby. Z těchto postupů získáme ze základního materiálu konečný výrobek.

Při výrobě kompozitů se využívají formy, které mají negativní tvar výrobku.

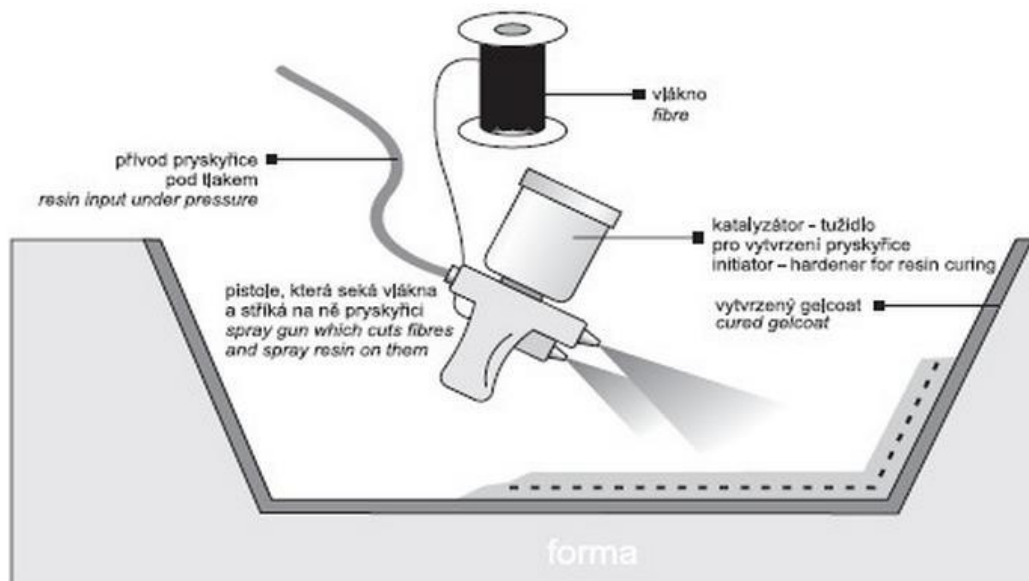
Druhy forem.

- Otevřené
- Uzavřené

2.1 Stříkání

Katalyzované pryskyřice s krátkými vlákny jsou pomocí stříkání nanášeny na otevřenou formu. Při ručním stříkání je do stříkací pistole zaveden svazek nekonečných vláken bez zákrutu tzv. roving, který je sekán na drobná vlákna.

U této metody je třeba použít do pryskyřice větší množství rozpouštědla, protože se při této technologii odpařuje relativní rozpouštědlo. Ve velké většině výroby se používají stříkací roboti. Tato metoda je pro pracovníky velmi riziková, poněvadž dochází k nebezpečnému vypařování pryskyřic.



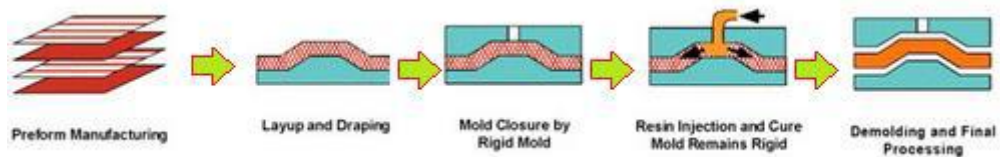
Obr. 5 Schéma výroby kompozitu stříkáním [29]

2.2 Vysokotlaké vstřikování (RTM)

Tady touto metodou je výztuž kladena do formy, kde po uzavření formy dojde ke vstřikování pryskyřice. Po ukončení vstřikování a dokonalém doplnění formy dochází k vytvrzování kompozitu. Dále se forma otevře a výrobek se vyjme.

Zde je důležité, aby byla pryskyřice dostatečně tekutá, aby zatekla do celé dutiny formy. Díky velkému odporu pryskyřice, je potřeba vysokého tlaku pro přetlačení. Pokud se použije více vrstev výztuže, tak se může stát, že nedojde k prosycení všech vrstev. Dále pak je třeba se zaměřit na správné ustavení výztuže ve formě z důvodu, aby se výztuž při vstřikování neposunula.

Pokud uvažujeme použití pryskyřice s plnivem, musíme si dát pozor na vhodné kladení výztuže. Pryskyřice s plnivem má tendenci proudit po směru vláken. Výhodou této metody je, že všechny plochy výrobku jsou takové jakosti, jaké je povrch formy. Ovšem velkou výhodou je nelze vyrábět složitějšími tvary. Tuto metodu lze podpořit použitím vakua při odsávání vzduchu z formy. Tato metoda se nazývá a Vacuum assisted RTM-VARTM. [29]



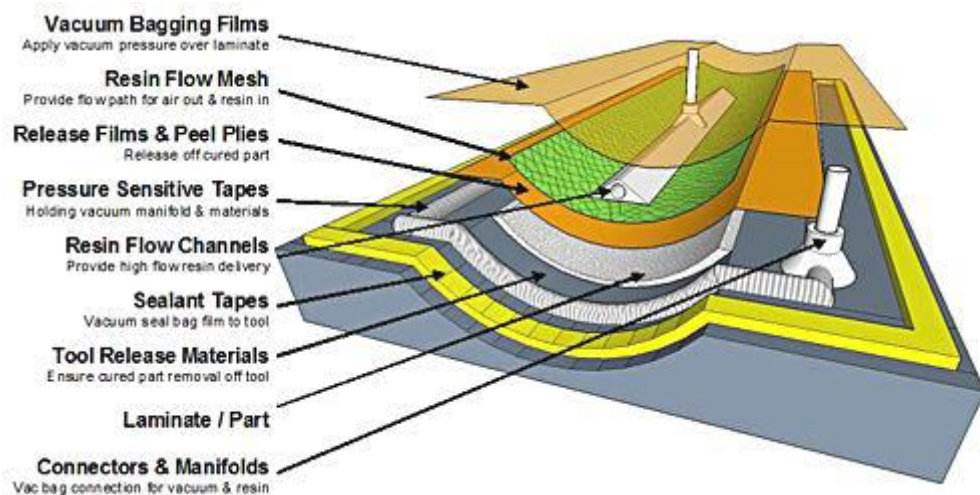
Obr. 6 Postup výroby pomocí RTM [29]

2.3 Vakuová infuze (VFI)

Zde se jedná o technologii, při níž se využívá k vyztužení vakuum. Výztuž je umístěna na otevřenou formu. Forma musí být dostatečně ošetřena voskem. Pokud nedojde k tomuto ošetření, výrobek nejde z formy sundat. Jednotlivé vrstvy tkaniny se kladou postupně na sebe. Na poslední vrstvu se umístí odtrhovaná tkanina a rozvodová tkanina. K dobrému rozvodu pryskyřice je dobré použít resintrack. Jedná se o speciální pleteninu odolnou vůči zborcení, jež se umísťuje pod přívod pryskyřice. Tu přivádíme hadicí o požadovaném vnitřním průměru. Vzduch je odsáván vývěvou, taktéž pomocí hadi a spirálových hadic.

Po vytvoření přívodového a odvodového systému, je vrstva připravena pro překrytí vakuovou fólií. Ta je utěsněna například těsnící páskou, která nám zajistí solidní těsnost pro vytvoření požadovaného vakua.

Při tomto procesu vakuové infuze je pryskyřice nasávána ze zásobníku. Ta následně proudí formou, kde při prosytí výztuž a vyplní formu. Přebytečná pryskyřice následně pře-padne do rezervoáru a tím ochráníme vývěvu před poškozením. [29]



Obr. 7 Součásti forem pro vakuovou infuzi [29]

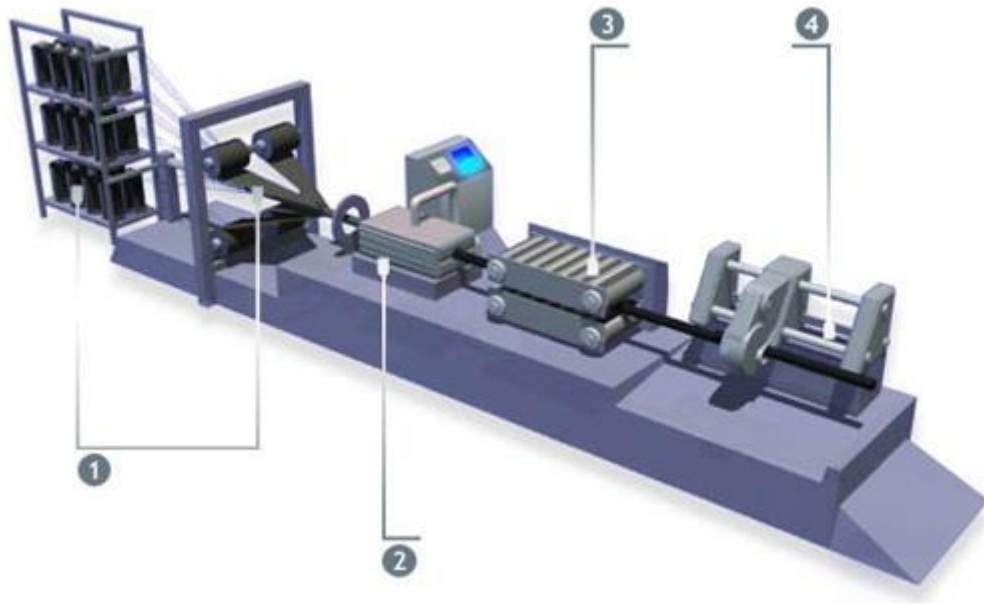
2.4 Pultruze

Touto metodou pojednáváme metodu pro výrobu kontinuálních kompozitních profilů. Zde se rozeznává uzavřený a otevřený výrobní postup.

Při otevřeném postupu se vedou vlákna do vany s pryskyřicí, s cestou přes ponořovací válec. Zadaný profil se tvoří pomocí rozdělení vláken zvláštní mřížky. Poté se vlákna namáčejí v pryskyřici a prochází několika oddíly. V těch se směs vláken a pryskyřice postupně formují až na konečný tvar.

Dále máme uzavřený postup. Při tom se dostávají všechny vyztužovaná vlákna do styku s pryskyřicí až při formování, ale pod tlakem. Tímto postupem lze dosáhnout vyšších objemů obsažených vláken, lepší impregnace a snížení emisí styrenu. Kompozit tvrdne v pultruzáčním zařízení kontinuálně při teplotách mezi 100 a 200°C. Vytvrzený profil se pak může rozřezat. Velikost dílů je libovolná a nezáleží na velikosti.

Celý proces udržujeme v chodu pomocí tažného zařízení. Toto zařízení táhne vytvrzený profil spolu s přiváděnými vlákny.[29]

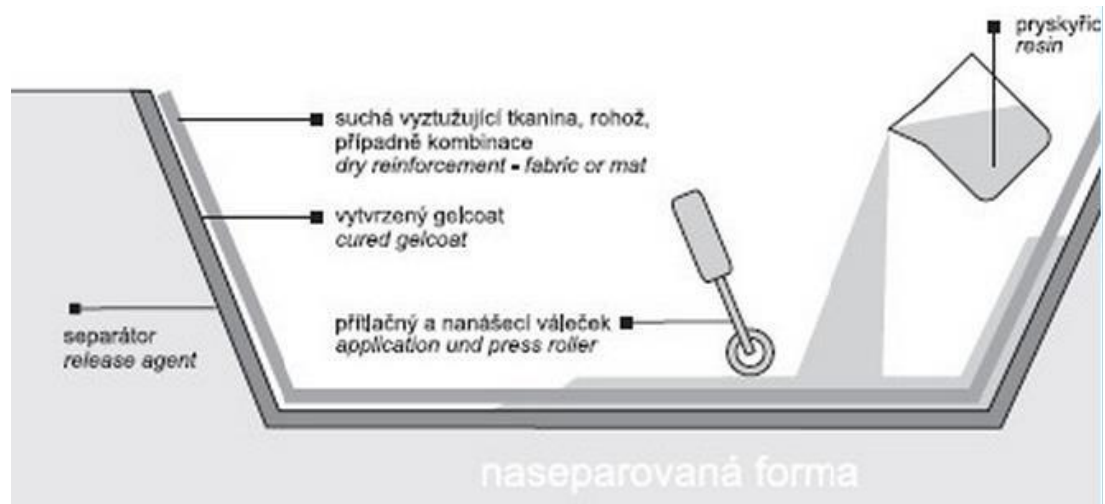


Obr. 8 Uzavřená pultruzační linka (1-výztuž, 2-tlaková pultruze, 3-odtah, 4-dělicí zařízení) [29]

2.5 Ruční kladení

Metoda ručního kladení je základní metodou výroby kompozitu. Kladení se provádí do/na otevřené formy. Tato metoda slouží k výrobě velmi rozměrných a tvarově náročných výrobků.

Pro usnadnění práce s jednotlivými komponenty je vhodné, aby výztuž ve formě tkaniny nebo rohože a pryskyřice při výrobní teplotě tekla. Při ručním kladení je třeba provést prosycování, které se provádí pomocí stěrky, štětce nebo válečku. Je to činnost, při které se do výztuže dostává co nejvíce pryskyřice a zároveň se z budoucího kompozitu vytlačuje co nejvíce vzduchových bublinek. Ty nám nepříznivě ovlivňují mechanické vlastnosti kompozitu. Pro prosycení následuje vytvrzování. To se provádí při pokojové teplotě. [29]



Obr. 9 Schéma výroby kompozitů ručním kladením [29]

3 ELEKTRICKÁ VODIVOST

Elektrická vodivost je fyzikální veličina, která popisuje vedení elektrického proudu určitým materiálem. Kompozitní materiál je za běžných podmínek elektricky nevodivý prvek. Pokud chceme, aby se staly elektricky vodivými, musíme k nim přidat prvky elektricky vodivé.

Podle nositelů elektrického náboje se elektrická vodivost dielektrik rozděluje:

- Iontová
- Elektronová
- Elektroferotická [13]

U iontové vodivosti se o přenos elektrického náboje starají ionty. Ty mohou být součástí materiálu, nebo mohou pocházet z nečistot. U elektronové vodivosti dojde k přenosu elektrického náboje za pomoci volných elektronů. U elektroferotické vodivosti nese elektrický náboj koloidní částice. Tato vodivost je pouze u kapalných látek s příslušnou koloidní částicí.

Dále můžeme elektrickou vodivost rozdělit podle pohybu náboje a to na vnitřní a povrchovou elektrickou vodivost. Vnitřní vodivost se nejčastěji vyskytuje u látek různého skupenství. Povrchová vodivost se vyskytuje pouze u látek pevného skupenství. Povrchová vodivost závisí především na schopnostech materiálu odpuzovat vodu a především na vlhkosti materiálu. Na to má největší vliv hladkost povrchu.[29]

Předpokládáme, že vnější elektrické pole drží na koncích tělesa o délce: Lo a ploše průřezu Ao konstantní potenciálový rozdíl (napětí) U (volt – V). Způsobuje přitom tok náboje, proud I (ampér – A). Jednotka náboje Q je coulomb, lze také použít označení ampérsekunda, platí: $1C = 1A.s$ a $I = dQ / dt$). Intenzita elektrického pole E v daném místě je rovna potenciálu záporného gradientu. Pokud je pole homogenní, pak $E = U / Lo$ ($V.m^{-1}$). Pole s jednotlivou intenzitou působí na náboj 1 C silou 1 N. Jednotkou intenzity elektrického pole nazýváme: *newton na coulomb*, jen tehdy však platí: $1J = 1VC = 1Nm$, je $NC^{-1} = 1V.m^{-1}$ a uvedená jednotka intenzity pole se proto obvykle uvádí pod názvem: *volt na metr*. Proud, který prochází jednotkou plochy průřezu je proudová hustota: $J = I / Ao$

(Am^{-2}). Chování látek se obvykle udává Ohmovým zákonem. Při zvýšení napětí U (intenzity E) se úměrně zvýší i proud I (hustota proudu J). [6]

$$I = \frac{dQ}{dt} = GU$$

$$J = \sigma E$$
(1)

Poměr proudu a napětí $G = I/U$ se jmenuje *vodivost* tělesa, jeho konduktance.

Poměr plošné hustoty proudu a intenzity elektrického pole se nazývá *měrná elektrická vodivost* látky ($\text{Sm}^{-1} = \text{AV}^{-1}\text{m}^{-1}$)

$$\sigma = J / E = Gl_0 / A_0$$
(2)

Odpor R (ohm, $\Omega = \text{S}^{-1}$) je převrácenou hodnotou vodivosti:

$$R = U / I = 1 / G$$
(3)

Rezistivita ρ ($\Omega\text{m} = \text{mS}^{-1}$) je převrácenou hodnotou měrné elektrické vodivosti:

$$\rho = E / J = 1 / \sigma = Ra_0 / L_0$$
(4)

Základní rozdělení:

Tab. 3.1 Klasifikace elektricky vodivých látek [6]

$10^2 - 10^8$	kovy, vodivost s teplotou klesá
$10^{-8} - 10^2$	polovodiče, vodivost s teplotou roste
$10^{-20} - 10^{-8}$	izolátory, vodivost s teplotou roste

Při 20°C

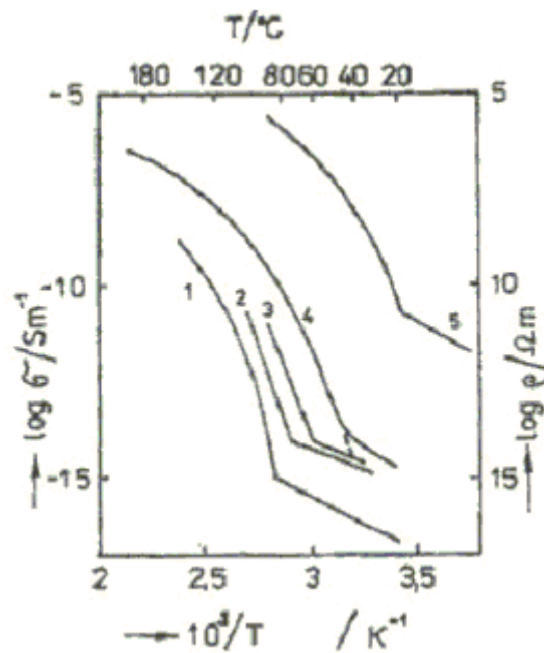
$$\frac{\sigma}{\text{Sm}^{-1}}$$
(5)

Podrobnější klasifikace:

$$\frac{\sigma}{\text{Sm}^{-1}}$$
(6)

Tab. 3.2 Podrobnější klasifikace elektricky vodivých látek [6]

Věší než 10^2	kovy
$10^{-1} - 10^2$	polokovy
$10^{-3} - 10^{-1}$	polovodiče
$10^{-14} - 10^{-5}$	poloizolátory
Menší než 10^{-14}	izolátory



Obr. 10 Závislost el. vodivosti některých polymerů na teplotě (arrheniovské souřadnice) [6]

- 1 – PVC, měření za $2 \cdot 10^4$ s
- 2 – PVC, měřená za 10^2 s
- 3 – PEPT
- 4 – PA 6,6
- 5 – PVAC – křivka podle rovnice

Ve velmi širokém rozmezí leží měrná elektrická vodivost různých typů látek při 20°C . Některé polymery (např. polytetrafluoethylen) mají extrémně nízké hodnoty $\sigma = 10^{-19} - 10^{-20} \text{ Sm}^{-1}$. Ty jsou na hranici měřitelnosti. Naopak velmi vysoké hodnoty

dosahují kovy, hlavně měď, jejichž měrná vodivost je $5 \cdot 10^7 \text{ Sm}^{-1}$. V tab. 2 je uvedena klasifikace látek podle měrné elektrické vodivosti. [6]

Vodivost izolátorů a polovodičů s rostoucí teplotou taky roste. K popisu teplotní závislosti se nejčastěji používá Arrheinova rovnice: [6]

$$\sigma = \sigma_0 e^{-E_\sigma / RT} \quad (7)$$

kde σ_0 je před exponenciální faktor, který má význam konduktivity při vysoké teplotě. U polymerů však rovnice vyhovuje především jen v malém teplotním intervalu. Je to vidět z obr. 10, kde se nachází v arrheniových souřadnicích teplotní závislosti konduktivity několika polymerů. Společným znakem těchto závislostí je zlom v okolí teploty skelného přechodu. Třeba u polyvinylacetátu ($T_g = 27^\circ \text{C}$) k němu dochází při teplotě: $T_0 = 20^\circ \text{C}$ (křivka 5). Nad teplotu T_0 , tzn. v kaučukovité oblasti, vzrůstá konduktivita polyvinylacetátu a jiných amorfních i některých jiných semikrystalických polymerů, mnohem rychleji než pod teplotou T_0 . Příznačný popis závislosti nad teplotou T_0 poskytuje rovnice typu volnoobjemového.

$$\sigma = \sigma_\infty e^{-1/f} \quad (8)$$

$$f = f_0 + \alpha_f (T - T_0)$$

kde σ_∞ je hodnota mezní konduktivity při vyšších teplotách, F – poměrný volný objem, f_0 – jeho hodnota při teplotě zlomu T_0 (tj. v oblasti teploty T_g) α_f – jeho teplotní koeficient. Když porovnáme změřené závislosti konduktivity polyvinylacetátu na vysoké teplotě, byly nalezeny hodnoty těchto parametrů:

$\sigma_\infty = 3 \cdot 10^{-3} \text{ Sm}^{-1}$, $f_0 = 0,053$, $\alpha_f = 13,9 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$. Hodnoty f_0 , α_f jsou zde asi 2x větší, než jsou hodnoty f_g , α_f nalezené z viskozních měření u průměrné taveniny. Rozdíl je zřejmě způsobený přeskokováním nositele náboje na menší objem. Proto je také menší kritický objem vakance V_k^+ , než daný segment. V tomto důsledku se vodivost při zahřívání z oblasti skelného přechodu do oblasti velice vysokých teplot změní pouze o $1/0,053 \cdot 2,3 = 8,2$ dekadických logaritmičeských řádů. Oproti tomu viskozita průměrně taveniny o 17,4 řádu. Rovnici (8) lze použít i pod teplotou T_0 se stejnými hodnotami σ_∞ , f_0 ,

avšak se zmenšenou hodnotou teplotní roztažnosti volného objemu $\alpha_{f,G}$. V případě polyvinylacetátu $\alpha_{f,G} = 2 \cdot 10^{-4} K^{-1}$. Použitelnost rovnice (8) pro dané polymerní materiály značí, že volný objem tu hraje důležitou úlohu při transportu náboje. U některých případech se objevují komplikovanější závislosti. Zde dochází k náhlé změně koncentrace nositelů náboje. [6]

3.1 Měření elektrické vodivosti

Toto měření se provádí v elektrickém okruhu, kde se pak měří jen proud a napětí. Polymer se umístí mezi dvě deskové elektrody. Ta má tloušťku d . [12]

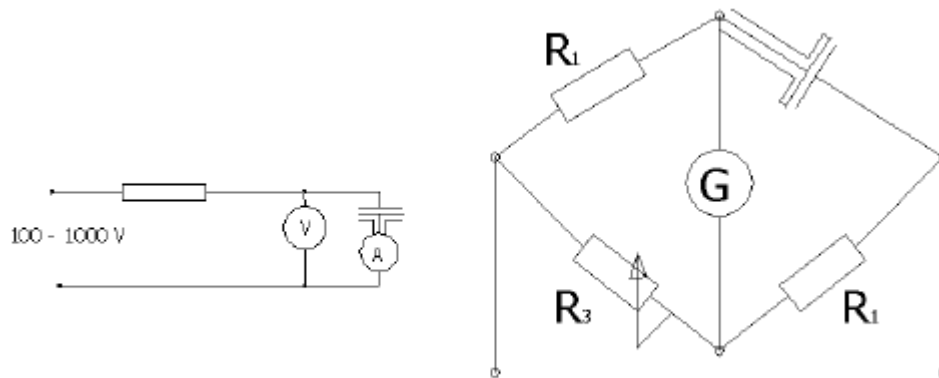
$$\text{Pak } k = \frac{1}{R} \cdot \frac{d}{F} \quad (9)$$

d - vzdálenost elektrod – tl. vzorku

F - plocha styku elektrod se vzorkem

R – celkový odpor soustavy: elektrody - vzorek

Obvody:



Obr. 11 Odporový dělič a zapojení do můstku [12]

4 ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI POLYMERNÍCH KOMPOZITŮ

4.1 Elektricky vodivé polymery

Elektrická vodivost skoro všech polymerů v čistém stavu je velmi nízká. Hodnoty měrného odporu se pohybují v oblasti 10^{12} až 10^{16} Ohm/cm. Z tohoto pohledu je možné všechny polymerní materiály považovat za velmi dobré izolanty. Určité zvýšení elektrické vodivosti je zapříčiněno nejvíce přítomností nečistot. Proto při přípravě izolanů s mimořádně vysokým měrným odporem je potřeba pracovat v prostředí kde není žádný prach. Přítomnost mikroheterogenit ve struktuře poskytuje také možnost vzniku volného náboje, který je vázaný na svoji strukturu. Těmito mikroheterogenitami mohou být rozhraní mezi krystalickou a amorfni fází, kde může dojít k termické aktivaci elektrického náboje. Takovéto zvýšení vodivosti má iontovou povahu a nastává v důsledku disociace přítomných nečistot. [31]

Navzdory tomu, že většina polymerů jsou dielektrika s velmi dobrými ozoilačními vlastnostmi, tak existují polymery, které jsou inhertně vodivé. Jsou to hlavně makromolekuly, které v řetězci obsahují systém konjugovaných vazeb. Po expozici těchto polymerů v silných oxidačních anebo redukčních činidlech dochází k výraznému zvýšení elektrické vodivosti. K nejvíce rozšířeným elektrovodivým polymerům, patří zejména transpolyacetylen, polypyrol, polytiofen, polyanilin, poly-p-fenylén a plno dalších. Tyto materiály se dostávají i k významným aplikacím, například jak je potřebné použít vodivé materiály v korozivzdorném prostředí, kde není možno využít kovy. Problém je skutečnost, že konjugované sktruktury tvoří polymerní řetězce s nízkou pohyblivostí a z tohoto důvodu jsou polymery s touto strukturou nezpracovatelné běžnými technologiemi. Pro jejich použití je potřebné tvarování při syntéze (např. vytvoření nánosu vodivého polymeru na povrch elektrody. Anebo aplikace ve formě koloidů a kompozitů. Tam vodivý polymer vystupuje ve funkci plniva. [31]

Za určitých okolností má i vysokou vodivost polymer, který neobsahuje konjugované vazby. Když na polyizopén působíme jódovými parami, může dojít ke zvýšení jeho vodivosti až na hodnoty 10^{-1} S/cm. O mechanismu přenosu náboje v těchto systémech se však názory výrazně liší. [31]

4.2 Elektricky vodivé kompozity

Příprava elektricky vodivých kompozitů je jiná možnost jak získat vodivé materiály na bázi polymerů. Princip této metody je velice jednoduchý. Do nevodivé termoplastické matrice se přimíchává elektricky vodivé plnivo. To zabezpečí podstatné zvýšení vodivosti. Na rozdíl od inertních vodivých polymerů, je výhodou těchto materiálů, že je lze tvarovat technologií, která se používá i na zpracování termoplastů. Vzhledem na vysoký podíl plniva a s tím související vysokou viskozitou samotná příprava kompozitu zamícháním komponentů nad teplotou topení polymerní matrice, jak je následné tepelné tvarování nemusí být vždy jednoduché. Jako plnivo lze použít plno druhů částic. Lze také použít vlákna, která jsou elektricky vodivé. Nejčastěji se používají formy uhlíku (saze, grafit), kovové částice, nebo i elektro-vodivé polymery ve formě prášku. Zajímavou možností jsou částice konvekčních polymerů, které jsou potáhnuté nánosem kovu, anebo vodivého polymeru. Tyto jsou výhodou z hlediska podobné hustoty jako má matrice, tak jak chceme plnivo využít v tavenině anebo roztoku (např. elektro-vodivé adheziva) a chceme tak zamezit usazování plniva při skladování. [31]

Z hlediska vodivosti při elektro-vodivých kompozitech pozorujeme zajímavý efekt. Tímto efektem je myšleno existence perkolačního prahu. Tento se projevuje prudkým zvýšením vodivosti o několik řádů v úzkém rozmezí koncentrace vodivého plniva. Vysvětlení tohoto jevu spočívá ve vytvoření vodivých propojení přes celý geometrický průřez sledovaného tělesa. Při postupném zvyšování koncentrace vodivého plniva se úměrně zvyšuje vodivost v důsledku rychlého přeskokování elektronů přes ohraničené materiály, které jsou vytvořené chumlem vodivého plniva. Počet těchto aglomerátů a jejich velikost se s růstem koncentrace plniva postupně zvyšuje, přičemž vodivost roste víc. Při určení koncentrace se z částic plniva vytvoří prvé vodivé propojení přes celý průřez tělíska. Tato skutečnost vytvoří celkem novou situaci. V té může elektron přeběhnout přes celý průřez bez toho, aby musel překonávat diskrétní oblasti tvořené jen z nevodivé matrice. Oblast koncentrace, při které dochází k tomuto jevu nazýváme perkolační práh. Vodivost se zvýší v rozmezí přídatku cca 1-3% plniva minimálně o 4, ale i 4 řádků. Při dalším přidávání plniva se zvyšuje počet vytvořených vodivých cest a vodivost dále narůstá, ale prakticky opět relativně pomalu a úměrně s růstem koncentrace plniva. Toto následné zvýšení představuje další 2-3 řádky v rozmezí změny koncentrace 13-30 obj. % plniva. [31]

Koncentrace perkolačního prahu závisí velmi od vlastností plniva a matrice. Všeobecně lze říci, že s růstem anizotropie vodivých částic perkolační práh výrazně klesá. Takéž náchylnost plniva k tvorbě aglomerátů vede k poklesu perkolační koncentrace. Z tohoto pohledu pro nízký perkolační práh kompozitu jsou výhodné uhlíkové vlákna (anizotropie) a saze (tvorba agregátů), nejméně y, které mají tendenci tvořit aglomeráty nepravidelného anebo dokonce řetězového tvaru. Méně vhodně jsou částice grafitu, anebo kovové pravidelné částicové izotropní útvary. Například s vysoko-vodivými sazezi Chezcarb možno dosáhnout perkolační práh v polyetylenové matrici už při koncentraci okolo 2 hm %. Na druhé straně třeba říci, že mimořádná tendence těchto sazí aglomerovat do anizotropních útvarů vede k rychlému růstu viskozity taveniny a podstatnému zhoršení zpracovatelnosti kompozitu už při obsahu plniva jen několika procent. [31]

Vodivost kompozitu a perkolační koncentrace výrazně závisí i od kvality matrice, především od jeho krystalického podílu. Při amorfních polymerech se totiž celé plnivo rozpůlí rovnoměrně do celého objemu, zatím co při semikrystalických matricích se plnivo uloží jen v amorfní fázi. Perkolační práh je proto možné dosáhnout s menší koncentrací plniva v případech, jak matrici tvoří amorfní polymer. Například perkolační práh pro ataktický polystyren představuje koncentraci cca 17 obj %, pro středně krystalický hustotní polyetylén je to okolo 8-10% a pro vysoko krystalický nízkohustotní polyetylén je to jen cca 5%. Samozřejmě tyto údaje jsou jen orientační a závisí hlavně na kvalitě plniva. [31]

Jak bylo už řečeno dříve, náhlé zvýšení vodivosti v oblasti perkolačního prahu je zapříčiněné vytvořením vodivých cest pozůstávajících z elektro-vodivého plniva přes celý průřez zkušebního tělíska. Při této představě je lehké pochopitelné, že při mechanické deformaci vodivého kompozitu s kaučukovou matricí a obsahem vodivého plniva nad perkolační koncentrací dochází ke snížení vodivosti, když při jednoosé deformaci se poměrně rigidní vodivé propojení relativně lehké naruší. Na druhé straně je následný návrat do původního stavu po uvolnění napětí většinou nevede k obnovení původní vodivosti před aplikací deformační síly, ale poměry jsou komplikovanější. Podobné efekty změny vodivosti je možné pozorovat i při změnách rozměrů vodivého kompozitu v důsledku tepelné roztažnosti při zahřívání nebo chlazení materiálu. [31]

Další zajímavou věcí těchto materiálů je výrazné křehnutí při zvyšování obsahu plniva. Toto je možné charakterizovat například hodnotou prodloužení při přetrhnutí. Je zajímavé, že oblast koncentrace, v které dochází k největšímu poklesu prodloužení v mnohých

případech, zodpovídá perkolační oblasti, v které dochází k výraznému zvýšení elektrické vodivosti. Vysvětlení je založené na úvaze, že vytvoření elektro-vodivých cest z částic plniva současně představuje i ulehčenou cestu pro růst mechanické trhliny při aplikaci deformační síly. Trhlina se proto vytvoří při menším napětí a její růst je podstatně rychlejší, jak existuje struktura propojení tělíska přes celý objem. [31]

4.3 Vliv silového pole na chování polymerů

Silovým polem v této kapitole rozumíme především působení elektrického pole. Z tohoto hlediska můžeme definovat dva typy látek. Těmi jsou:

1. Vodič elektrického proudu, přes který je možný nevratný transport elektricky nabitých elementů částicové povahy
2. Dielektriku anebo izolátor, v kterém vzniká elektrické posunutí způsobené vznikem indukovaných dipólů, nebo orientací dipólů už přítomných v materiálu, přičemž je toto posunutí provázené akumulací energie a po odstranění pole je vratné. [31]

Přechod mezi těmito skupinami látek je plynulý a na vlastnosti mají také vliv i vnější podmínky, např. teplota. Dělení podle hodnoty elektrické vodivosti σ je přibližně následovný: kovy s vodivostí 10^2 až 10^6 S/m, polovodiče s vodivostí v rozmezí 10^{-8} až 10^2 S/m a izolátory s vodivostí nižší jak 10^{-8} S/m. Běžné izolátory dosahují hodnoty 10^{-12} až 10^{-15} s hranicí někde kolem 10^{-30} S/m. Důležitou skupinou látek jsou z praktického hlediska látky antistatické, u kterých povrchová vodivost postačuje na rozptýlení elektrostatického náboje, který vzniká třením. Vodivost těchto látek se pohybuje v oblasti vodivých polovodičů, tj. okolo 10^{-6} S/m. Za zmínku stojí též změna vodivosti s teplotou. U kovu vodivost s rostoucí teplotou klesá, zatím co u látek z dalších dvou skupin vodivost s teplotou roste. Při popis růstu vodivosti s teplotou možno použít vztah Arrheinova typu:

$$\sigma = \sigma_{\infty} \exp(-E_a / RT) \quad (10)$$

Kde σ_{∞} je před exponenciální faktor s významem vodivosti při velmi vysoké teplotě a E_a je aktivační energie vodivosti. Pro polymery však rovnice (10) vyhovuje jen v úzkém rozmezí teplot. [31]

4.4 Elektrická pevnost polymerů

Jako bylo řečeno výše, podstatnou vlastností dielektrika je izolační schopnost, tj. schopnost odolávat účinku elektrického pole. Tato vlastnost ale závisí od vnějších podmínek. V tomto případě především od intenzity působícího elektrického pole. Při postupném zvyšování intenzity pole se dosáhne mezní intenzity, kde vodivost dielektrika vzroste na hodnoty charakteristické pro vodiče. Tento stav se projeví navenek elektrickým průřezem. Zodpovídající napětí, které odpovídá intenzitě pole se, nazývá průrazné elektrické napětí U_p . Toto vztahování na tloušťku charakterizuje elektrickou pevnost $E_p = U_p / d$, kde E_p má rozměr elektrického pole, tj. V/m. [31]

Mechanismus průřezu je složitý a někdy nezávisí od hloubky ani času. Nejčastěji se přímým měřením získá relativní údaj E_p , který závisí od geometrie vzorku a podmínek měření. Z tohoto důvodu elektrickou pevnost nemůžeme považovat za materiálovou charakteristiku a pro její stanovení je potřeba používat normované zkoušky. [31]

Elektrická pevnost polymerů závisí kromě vnějších podmínek (teplota, geometrie tělesa) také i na struktuře polymeru. Všeobecně můžeme říci, že elektrická pevnost roste se snižováním pohyblivosti článků řetězce a s růstem molekulové kohezi. Z tohoto hlediska klesá v pořadí POLYVINYLALKOHOL – POLYMETYLMETAKRYLÁT – POLYSTYRÉN. Nejnižší je pro nepolární polymery s vysokou pohyblivostí segmentů např. polyolefiny a kaučuky. [31]

Na základě toho co bylo psané dříve, se pozorovaně jeví snížení E_p v oblasti nad teplotou skelného přechodu, kde se pohyblivost řetězců výrazně zvýší. Hodnota E_p roste se stupňovitým uspořádáním, např. krystalinitou. Z molekulového hlediska můžeme zdůraznit nepřímou úměrnost volnému objemu. [31]

4.5 Dielektrické vlastnosti polymerů

Polymery jsou typické dielektrika s nízkou elektrickou vodivostí a relativně vysokou elektrickou pevností. Na venek je každé dielektrikum elektricky neutrální, protože obsahuje stejný počet kladných záporných nábojů v dipólech. V elektrickém poli však dochází k orientaci dipólů ve směru působícího pole k tzv. polarizaci dielektrika. Jak na deskový kondenzátor připojíme zdroj napětí U , tak se prakticky nabije okamžitě náboj $+Q$ resp. $-Q$,

přičemž velikost náboje $Q_0 = C_0 \cdot U$ je přímo úměrná napětí U a konstanta úměrnosti C_0 s rozměrem Farad, $F = CxV^{-1}$ se nazývá vakuová kapacita kondenzátoru. Plošná hustota náboje je tedy přímo úměrná intenzitě pole mezi deskami $E = U/d$.

Jak vyplníme prostor mezi deskami dielektrikem, účinek elektrického pole dojde k polarizaci. Mírou schopnosti dielektrika polarizovat je veličina nazvaná elektrická polarizace P , daná vztahem

$$P = D - \varepsilon_0 E \quad (11)$$

kde D je elektrická indukce ($D = \varepsilon E$, přičemž ε představuje permitivitu dielektrika) a ε_0 je permitivita vakua. Tyto veličiny jsou mírou schopnosti dielektrika polarizovat se, zvyšovat kapacitu kondenzátoru a zeslabovat silový účinek elektrického pole. Ve všeobecnosti je polarizace dielektrika funkcí času. Tato veličina se skládá z více složek, které se liší časovou reakcí na změny pole. Elektrická polarizace P_e nastává na úrovni jednotlivých atomů a je způsobená posunem vnějších elektronů elektronového obalu. Tímto způsobem vznikají dipóly v časovém intervalu pořadí 10^{-15} s. Pomaleji probíhá atomová polarizace, řádově v čase 10^{-13} s, která vzniká působením elektrického pole na polární vazbu, přičemž se změní vzájemná vzdálenost atomů ve vazbě i valenční úhel. Elektronová a atomová polarizace představuje tzv. deformační polarizaci P_d . Tato možnost při frekvenci změny polarity pole menší jako 10^{12} považovat za okamžitou a vznik těchto indukovaných dipólů bude ve fázi s měnícím se elektrickým polem. Nejvýznamnější z tohoto typu polarizací je tzv. elastická dipólová polarizace, která je způsobená pružným vychýlením dipólů v elektrickém poli z rovnovážných poloh s nejnižší energií, které dipóly zastupují v prostředí sousedních molekul bez působení pole. Tyto tři typy polarizace lze zahrnout pod společný název elastická polarizace a charakterizuje ji velmi rychle, prakticky okamžité zaujetí daného stavu po aplikaci elektrického pole a taktéž prakticky okamžitý návrat do původního stavu po zrušení pole. [31]

V mnohých látkách však existují také permanentní dipóly, tvořené polárními vazbami mezi dvěma atomy s odlišnou elektroafinitou. Ve vazbě např. uhlík-chlór jsou vazbové elektrony přitahované víc na stranu atomu chlóru s těžším kladně nabitým jádrem. Celkově je tato vazba permanentním dipólem s parciálně kladným nábojem na uhlíku. Na rozdíl od

elastické dipólové polarizace se předpokládá, že permanentní dipól může mít i víc rovnovážných poloh, které jsou kvalitou odlišné. Změna těchto poloh je podmíněná překonáním potenciální bariéry. Jak se tento permanentní dipól dostane do elektrického pole, bude mít snahu orientovat se ve směru pole a dojde k tzv. orientační polarizaci P_0 . Tento děj je však zpomalený v důsledku interakce se sousedními skupinami a proto je časově závislý. Celkový průběh je možno u mnohých polymerních látek popsat trojparametrovou funkcí:

$$P(t) = P_D + P_0(1 - e^{-t/T}) \quad (12)$$

kde P_0 je limitovaná hodnota orientační polarizace, ke které dojde při $t \rightarrow \infty$ a T je tzv. relaxační doba.

Jak se kondenzátor nachází ve statickém elektrickém poli s konstantní intenzitou, elektrická indukce je monotónní funkcí času. Jak se však intenzita pole mění s určitou frekvencí, polarizace nesleduje náhlé změny pole okamžitě, ale s určitým zpožděním. Průběh intenzity pole lze uvést v tvaru:

$$E(t) = E_{amp} \cdot \cos \varpi \cdot t \quad (13)$$

Elektrická indukce je také sinusovou funkcí se stejným kmitočtem, ale zpožděná o časový úsek, který je možno vyjádřit fázovým úhlem:

$$D(t) = D_{amp} \cos(\varpi t - \delta) \quad (14)$$

Pro každou frekvenci jsou amplitudy ve vztahu

$$D_{amp} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon(\varpi) E_{amp} \quad (15)$$

Kde $\varepsilon(\varpi)$ je frekvenčně závislá permitivita dielektrika (permitivita je mírou polarity a je rovná plošné hustotě náboje/intenzitě pole). Elektrickou indukci můžeme rozdělit na dvě vektorové části:

$$D(t) = D \cdot \cos \varpi t + D'' \cdot \sin \varpi t \quad (16)$$

Z kterých jedna je ve fázi s působícím polem a druhá je posunutá o 90° . Když:

$$D = \varepsilon_a \cdot \varepsilon(\omega) E \quad (17)$$

Definujeme vektorové složky $\varepsilon' a \varepsilon''$, které jsou také frekvenčně závislé a definované:

$$\varepsilon' = \varepsilon \cdot \cos \delta \text{ a } \varepsilon'' = \varepsilon \cdot \sin \delta \quad (18)$$

První charakterizuje reálnou složku permitivity, tj. jeho poměrnou kapacitu a druhá představuje ztrátové vlastnosti dielektrika. [31]

Deformační složky polarizace se stanovují v čase $10^{-13} - 10^{-15}$ a stačí se přizpůsobit změně pólu. Při orientační polarizaci je relaxační čas vyšší a to pro nízkomolekulární látky 10^{-8} až 10^{-12} a pro polymery ještě vyšší. Při malých kmitočtech (frekvencích) stačí obě složky polarizace-deformační i orientační sledovat změny pole, časové zpoždění je nulové a $\delta = 0$. Při vysokých frekvencích orientační složka nestačí prakticky vůbec reagovat na změnu pole, $\varepsilon^{(\infty)} = \varepsilon_{\infty}$, takže ztráty jsou zase nulové, $\varepsilon'' = 0$. Mezi těmito krajními mezerami je oblast, kde hodnoty jsou nenulové a možno měřit relaxační oblasti charakteristické pro daný materiál. Přitom na rozdíl od elastické polarizace, která nastává okamžitě, pro případ orientačně dipólové polarizace se předpokládá, že dipól má víc rovnovážných poloh. Polohy může měnit po překonání potenciální energetické bariéry, např. teplenou energií. [31]

Když postupně zvyšujeme frekvenci pole, přecházíme z oblasti, kde obě složky stačí sledovat změny a zaznamenávají maximální a konstantní indukci, do oblasti, kde ztrátová složka zpožďuje o konstantní časový úsek, a při vysokých frekvencích se opětovně dostane do oblasti, kde je indukce ve fázi, protože ztrátová složka ani náznakem nestihá reagovat na změnu pole. Frekvence, při kterých se pozorují fázové posuny, teda ztrátové složky, jsou charakteristické pro určitou strukturu. Takže pohyby dipólů, podléhajících orientační polarizaci, jsou ovlivněné strukturou materiálu. Jak se změní struktura, např. změnou teploty, přidávkem aditiv, které ovlivňují volný objem, změnou uspořádání řetězců, např. větvením a podobně, pozorujeme změny i v poloze registrovaným pohybem na frekvenční ose, jako jsou ve výšce odezvy, které charakterizují intenzitu daných pohybů. Tak můžeme zaznamenat relaxační spektrum, které interpretace je kvalitativně totožná se spektrem získaným metodou DMTA, takže ozrcadlíme přítomnost segmentů s rozdílnou strukturou. Proto toto spektrum možno použít pro charakteristiku sledovaného materiálu. Třeba říci, že touto metodou dosáhneme relaxačního spektra, které jsou obvykle o mnoho komplexnější jako spektra získané dynamickou analýzou. Poskytují teda víc informací o studovaném materiálu, ale na druhé straně je jejich interpretace o mnoho složitější. Tato metoda je méně rozší-

řena s porovnáním s DMTA a to i v důsledku experimentální, požadavkům a výšce technické náročnosti na měřícím zařízení. [31]

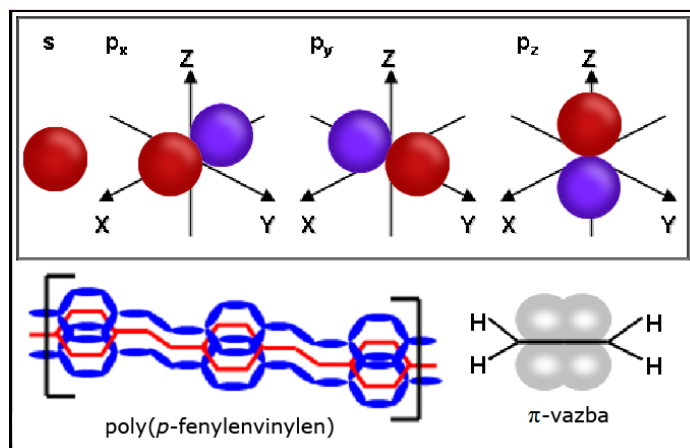
4.6 Princip vodivosti intrizitně vodivých polymerů

Mechanismus transportu náboje ve vodivých polymerech je jiný, než je klasický přenos náboje u izolátorů a kovů. Hlavní princip vodivosti v pevných látkách podrobně popisuje takzvaná pásová teorie vodivosti. Ta je založena na pohybu valenčních elektronů mezi energetickými pásy. Jinak řečeno mezi určitými energetickými hladinami, které elektrony v atomu zabírají. Aby byl materiál vodivý, musí elektron přejít z valenčního do vodivostního pásu. Tyto pásy jsou v případě polovodičů a izolantů odděleny zakázaným pásem, ten musí elektron překonat.

Chemická struktura kovů je dost odolná vůči mírnému neuspořádání. Jelikož se vyznačuje hustou periodickou mříží iontů s valenčními elektrony a jsou tedy dobře popisovány právě pásovou teorií. Naproti tomu se polymery vyznačují jako méně stabilní a jsou poddajnější při reagování na jiné externí podněty. U případu vodivých polymerů je náboj transportován podélně jejich řetězců. To hlavně díky konjugovaným systémům vazeb. Přesný model transportního mechanismu, není a nebyl ještě zcela objasněn. [7]

4.6.1 Chemická vazba a konjugace

Všechny běžné polymery mají řetězce obsahující pouze základní σ -vazby s velkým zakázaným pásem, náboje vytvořené podél jejich řetězců nejsou mobilní a tyto materiály jsou proto dobrými izolanty.[17] Konjugované polymery mají díky p_z orbitalům atomů řetězce rozšířený π -konjugovaný systém vazeb (obr. 12), který zaručuje potřebnou mobilitu nábojů, podél jejich řetězců.[18] Ve většině mají konjugované polymery velký energetický rozdíl mezi do plna zaplněným valenčním π -pásem (HOMO – highest occupied molecular orbital) a prázdným vodivostním π^* -pásem (LUMO – lowest unoccupied molecular orbital). Jako polovodiče se chovají v jejich neutrální formě. Ve většině případů jsou látky zbarvené z důvodu velké absorpce viditelného spektra spojené s $\pi - \pi^*$ přechodem. [19]



Obr. 12 Překrývání P_z orbitalů vede k XX -konjugaci a k vodivosti [18]

4.6.2 Transport náboje

Popsání přesného problému mechanismu přenosu náboje je velmi složitý. Leží totiž ve snaze vystopovat dráhu nosičů náboje uvnitř polymeru. Polymery jsou totiž vysoce neuspořádané systémy, které obsahují jak krystalické tak i amorfni fáze. Kromě transportu podél řetězců polymeru je nutné uvažovat s tím, že transport je pomocí komplexních vazeb mezi těmito fázemi. Studií polymerů pomocí konduktivity v závislosti na teplotě, proudu, frekvenci stupně dopování a magnetismu bylo prověřeno, že mechanismů transportu náboje je hned několik. Hlavní mechanismus spočívá v tom, že přenáší nosiče náboje podíl řetězce polymeru díky střídání jednoduchých a dvojných vazeb. Samotný π -konjugovaný vazební systém je důvod, proč jsou ve své neutrální formě zastoupeny konjugované polymery polovodiče. Ve stavu dopovaném pak dosahují konduktivity vodičů (viz. dopování polymerů). Mezi vodivými doménami také dochází k přenosu náboje. Ty vznikají díky nehomogennímu dopování, které vytváří vodivé ostrůvky izolované uvnitř nevodivé matrice. Dále k transportu dochází i díky tepelně aktivovaným přeskokům nebo tzv. tunelování. [28] Tyto mechanismy souhlasí teplotní závislosti měrné vodivosti σ :

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \exp\left\langle -(T_0 / T)^{1/(d+1)} \right\rangle \quad (19)$$

d je dimenze vzorku a σ_0 a T_0 jsou jeho výchozí parametry. U tří-rozměrných vzorků je exponent roven $1/4$ ($d=3$) a jedná se o tzv. Mottův vztah teplotní závislosti konduktivity. U velké řady polymerů bylo experimenty zjištěno, že exponent v teplotní závislosti je roven $1/2$. Toto odpovídá přenosu náboje podél jednorozměrného molekulárního řetězce ($d=1$). Pro lepší a přesnější popisování transportního mechanismu je ale potřeba ještě mnoho dal-

ších výzkumů. Nejlépe měřit závislost vodivosti na intenzitě el. pole, frekvenční a teplotní závislost permitivity, nebo koncentrace nepárových spinů, nebo zkoumání struktury pomocí rentgenového záření. [7]

4.6.3 Dopování polymerů

Máme dva požadavky pro dobrou vodivost polymerů. Jeden z nich je vysoká mobilita. Tu zaručuje konjugovaný systém elektronů, pomocí nich jsou mezi sebou molekuly v řetězcích vázány. Druhý požadavek je vysoký počet nosičů náboje. To plyne ze vztahu pro měrnou elektrickou vodivost v pevných látkách σ :

$$\sigma = n \cdot e \cdot \mu \quad (20)$$

, kde n - počet nosičů náboje, e – náboj elektronu, μ – mobilita. Nově připravované polymery obsahují malé množství nosičů náboje. Proto je jejich vodivost malá i přes jejich velkou mobilitu. [27] Zvýšení vodivosti může dojít při zvětšení počtu nosičů náboje procesem, který se nazývá podle analogie s klasickými polovodiči „dopování“, který spočívá v úpravě chemického složení přidáním oxidačního nebo redukčního činidla. [7]

- **Způsoby dopování**

Proces chemického dopování tedy spočívá v přidávání elektronu do vodivostního pásu polymeru s redukčními činidly (alkalické kovy) anebo odebráním elektronů z valenčního pásu polymeru. K tomu dochází pomocí oxidačních činidel (halogeny, AsF₃, FeCl₃, HClO₄ a další kyseliny). Velkou nevýhodou některých polymerů ovšem bývá nestabilita při vystavování okolnímu vzduchu. Vhodnějším způsobem přípravy vodivých polymerů ovšem bývá nestabilita při vystavení okolnímu vzduchu. Jiný vhodný způsob přípravy je elektrochemická polymerace. Při té přípravě je provedena polymerace z monomeru a zároveň oxidace v jednom kroku. Tyto polymery jsou nadále elektricky vodivé a stále hned po jejich přípravě. [27]

Další typem metody je iontová implantace. Ta spočívá v bombardování polymeru paprskem iontů. Tyto paprsky mají energii v rozmezí od 10keV, kdy jsou ionty implantovány pouze pod povrch, až po energii 2MeV, umožňující implantování skrz celou tloušťku vrstvy polymeru. Stabilita vodivosti těchto polymerů v okolním prostředí je velkou výhodou. Proces implantace o příliš vysokých parametrech způsobuje degradaci materiálu, při které dochází k jeho poškození. Naopak při nízké energii a dostatečně malém toku lze do-

sáhnout organických polovodičů se všemi výhodami iontové implantace, která umožňuje řízený proces vnitřního dopování. Vývoj takovýchto zařízení, které využívají tuto technologii je ale ještě na začátku a bude vyžadovat větší mobilitu a také vylepšené polymery jako např. oligomery či orientované polymery. [20]

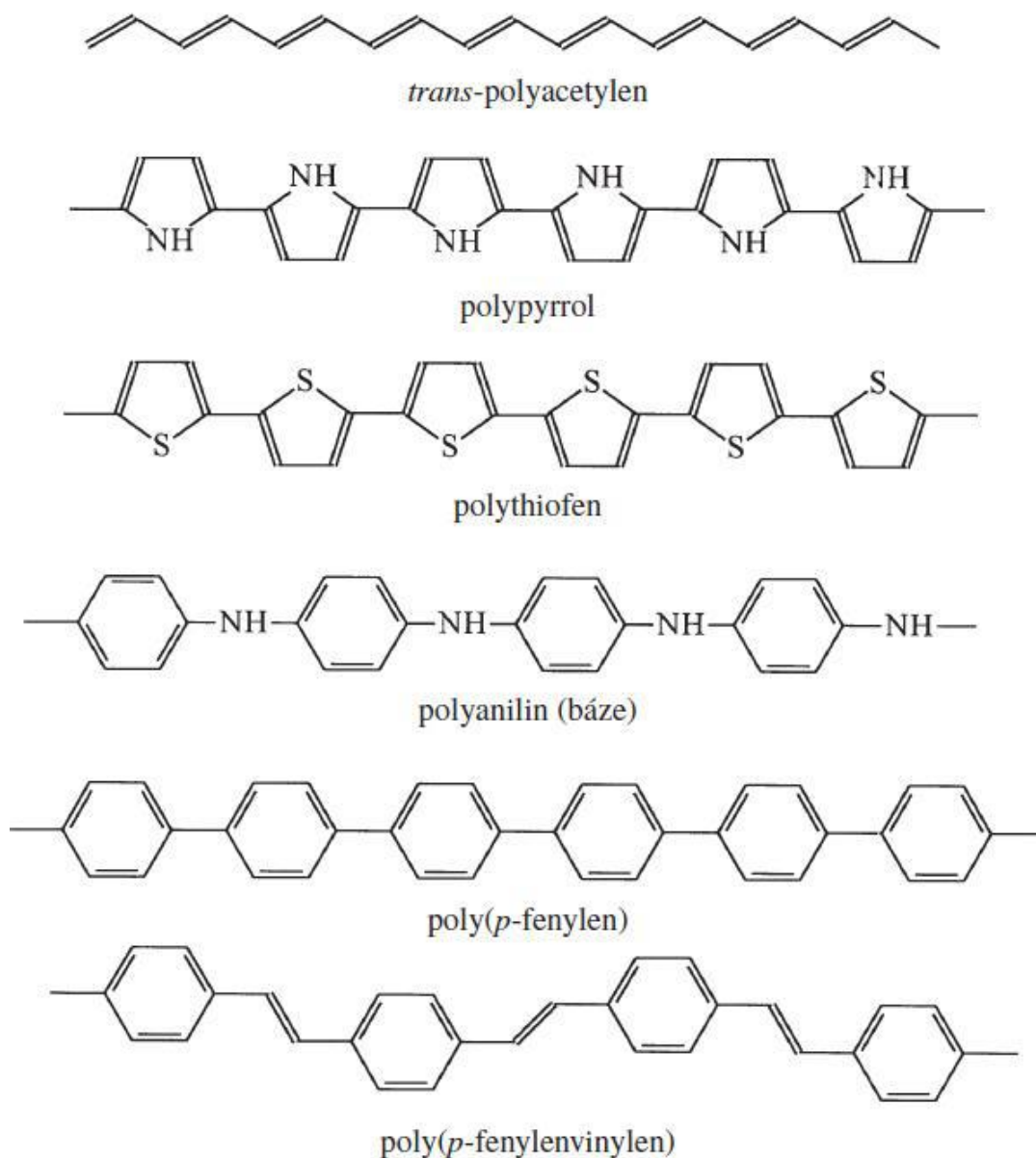
4.6.4 Stabilita konjugovaných polymerů

Od doby objevení vodivých polymerů mají tyto materiály díky své struktuře problémy se stabilitou. Převážně v dopované formě bývají tyto polymery náchylné na reakce, které probíhají s okolními látkami, těmi jsou např. kyslík, peroxidy nebo voda. Řetězce jsou totiž náchylné na reakce s elektrofilny, nukleofily a volnými radikály. Nyní jsou vyvinuty vodivé polymery, které mají dobrou stabilitu a ve formě dopované. [28]

Stárnutím polymerů lze ovlivnit jejich stabilitu. Vlivem času dochází u polymerů k degradaci struktury a to i bez působení okolních činidel. Díky vnitřním reakcím nábojů v řetězích polymerů může docházet ke vzniku hybridizovaných orbitalů uhlíku, které přerušují konjugaci. Polymery také vlivem teploty ztrácí dopanty. [28]

4.7 Zástupci konjugovaných polymerů

Mezi nejjednodušší zástupce vodivých polymerů se řadí polyacetylen. Jeho elektrické vlastnosti a schopnost tvořit vodivé deriváty pomocí procesu dopování, stojí za zrodem vodivých polymerů. Hlavní nevýhodou polyacetyleny bývá jeho velká nestabilita při vystavení okolním podmínkám. [21] Navzdory tomu se výzkum vodivých polymerů přesouvá spíše na více stabilní zástupce této třídy materiálů (polypyrrol a polyanilin). Ty jsou spolu s polyacetylenem nejvíce studované polymery. [7]



Obr. 13 Zástupci vodivých konjugovaných polymerů [7]

Mezi další polymery s intenzivní vodivostí lze zařadit například polythiofen, poly(p-fenylenvinylen), poly(p-fenylen) a poly(3,4-ethylendioxithiofen). [7]

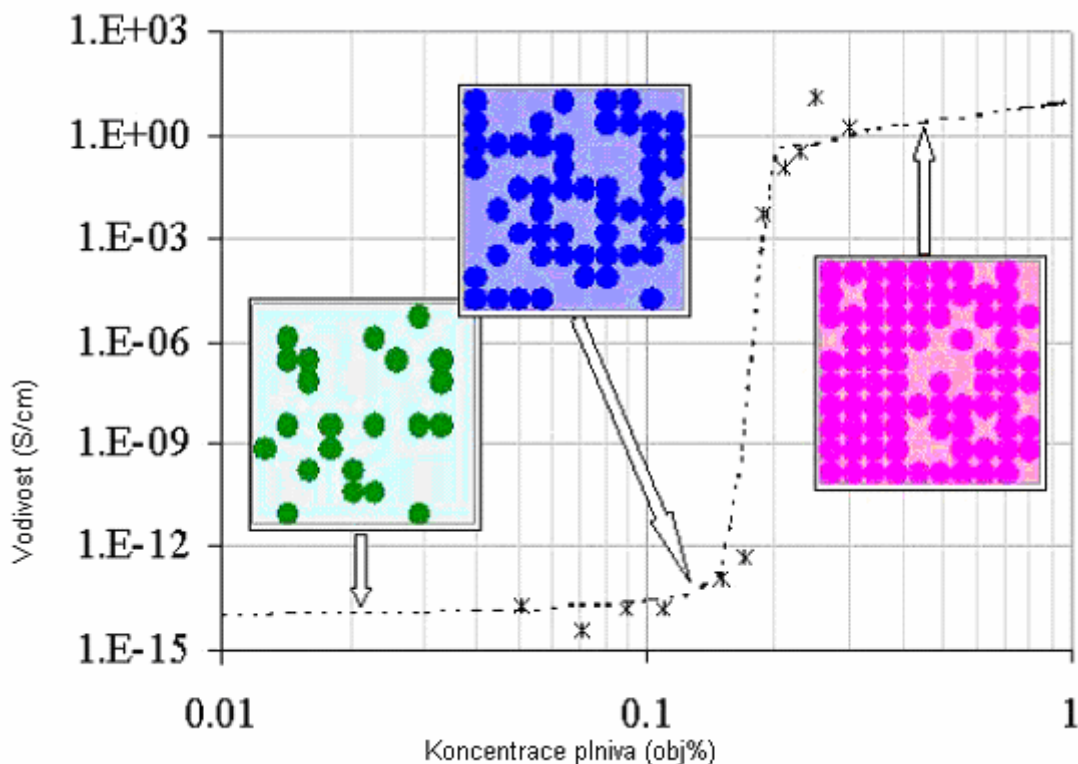
4.8 Oblasti využití vodivých polymerů

Oblasti se dají rozdělit na dvě skupiny. Do první skupiny patří polymery, které využívají chemické reaktivity konjugovaného vazebního systému, která způsobuje změny elektrických a optických vlastností těchto materiálů. Zde patří např. tepelné a chemické senzory, elektrické displeje nebo baterie. Do druhé skupiny patří polymery založené přímo na elektrické vodivosti a patří do ní aplikace jako elektrostatické materiály, vodivá pojiva,

elektromagnetické stínění anebo aktivní elektronické součástky – diody nebo tranzistory. [28]

4.9 Perkolační teorie

Perkolační teorie popisuje souvislost mezi vodivostí a koncentrací plniva náhodně rozptýlených vodivých částí v nevodivé matrici. [8] Perkolační teorie přináší možnost studia neuspořádaných struktur a objektů. Tyto struktury a objekty mají převážně složité a nepravidelné tvary (amorfnní látky, polymery, příměsové polovodiče atd.). Převážná část polymerů patří do skupiny izolantů. Těmi se rozumí takový materiál, u kterého pravděpodobnost přenosu náboje mezi dvěma vodivými místy klesá se šířkou vrstvy mezi nimi. Přenos proudu je závislý na existenci řetězce, který je tvořen vodivými částicemi. Perkolační teorie se zabývá výpočtem pravděpodobnosti vytvoření vodivé cesty. Perkolačním prahem je pak nazvána minimální koncentrace plniva, při které dochází k vytvoření první vodivé cesty, přes celý objem měřeného materiálu. [9]



Obr. 14 Závislost měrné elektrické vodivosti na koncentraci plniva [22]

4.9.1 Oblast pod perkolačním prahem

Při objemovém podílu, který je menší než objem kritický, je vodivost kompozitního materiálu funkcí, která se pomalu mění. Její hodnoty se přibližují hodnotám čisté matrice. [9] Mezi částicemi jsou velké vzdálenosti a přenos náboje tudíž není možný. Vodivost se s rostoucí koncentrací zvyšuje pouze mírně. Při nízké koncentraci plniva se nevytváří vodivá cesta. [8] Vodivost se tedy řídí vtahem: [9]

$$\sigma_c = \sigma_m (V_{kritické} - V_f)^{-q} \quad (21)$$

, kde:

$V_{kritické}$ kritický objemový podíl při perkolačním prahu

V_f objemový podíl plniva

q kritický exponent pod oblastí perkolačního prahu

4.9.2 Oblast perkolačního prahu

V této oblasti prudce roste počet kontaktů mezi částicemi plniva už s velmi malým nárůstem koncentrace plniva. Pokud se provádí postupné zvyšování podílu vodivého materiálu, tak dochází ke kritickému objemu plniva. Hodnota vodivosti skokem vzroste téměř na hodnotu vodivosti čistého plniva [14] platí, že:

$$\sigma_c = \sigma_f (\sigma_m / \sigma_f)^q \quad (22)$$

, kde:

σ_m vodivost matrice (S/cm)

s kritický exponent pro oblast perlokace

Hodnotu perkolačního prahu může ovlivňovat:

- Interakce mezi plnivem a matricí
- Distribuce a tvar plniva

Vodivá cesta je tvořená částí plniva a to se vzájemně kontaktuje, nebo je oddělené malými mezerami. Výsledným stavem je rázný nárůst vodivosti. [8]

4.9.3 Oblast nad perkolačním prahem

Podle perkolační teorie se kompozitní materiály nad oblastí perkolačního prahu řídí vztahem:

$$\sigma_c = \sigma_f (p - p_c)^t \quad (23)$$

, kde:

σ_c, σ_f vodivost kompozitů, resp. plniva (S/cm)

p pravděpodobnost nalezení vodivé fáze nad kritickou koncentrací

p_c kritická či prahová pravděpodobnost nalezení vodivé fáze

t kritický exponent pro oblast nad perkolačním prahem [9]

4.10 Dielektrika

Dielektrikum (odvozeno od řeckého slova dia=skrz). Toto zavedl roku 1839 M. Faraday, aby se dala označit látka, skrz kterou může procházet elektrické pole. Dielektrikum obsahuje náboje. Ty v něm jsou vázány a nemohou se vlivem elektrického pole pohybovat, tak jak se pohybují u vodičů. Polymerní materiály se chovají jako nevodiče pouze tehdy, pokud se nepoužije speciálních úprav. [9] Polymery se chovají jako dielektrika elektricky polarizovaná a to různě, podle toho zda se jedná o elektrické pole stejnosměrné, nebo střídavé. [10]

4.10.1 Polarizace dielektrika

Dielektrikum neobsahuje žádné volné elektrické náboje, ale je složeno z velkého množství částic, které obsahují elektrický vázaný náboj (např. atomy, ionty, molekuly apod.). Rozložení elektrického náboje v dielektriku je ovlivňováno vnějším elektrickým polem, které na tyto částice působí. Změněné rozložení nábojů zpětně ovlivní působící pole. Komplexní permitivita $\varepsilon^* = \varepsilon_T - i\varepsilon$, udává chování dielektrika ve vnějším el. poli. Reálná část ε_T , která se nazývá také relativní permitivita (dielektrická konstanta) vyjadřuje

poměr mezi kapacitou kondenzátoru s vakuem a dielektrikem. Imaginární část ε'' souvisí s dielektrickými ztrátami potažmo elektrickou vodivostí. [11]

Pokud vložíme dielektrikum do elektrického pole, nastává jev, kterému se říká **polarizace dielektrika**. Polarizace dielektrika může mít různý mechanismus [30]:

- a) Elektronová polarizace – posuv elektronů vůči kladným jádrům
- b) Atomová polarizace – posuv atomů v molekule

V praxi se vyskytují navzájem. U polárních dielektrik se ještě může uplatnit

- c) Orientační polarizace – natočení dipólů ve směru elektrického pole [10]

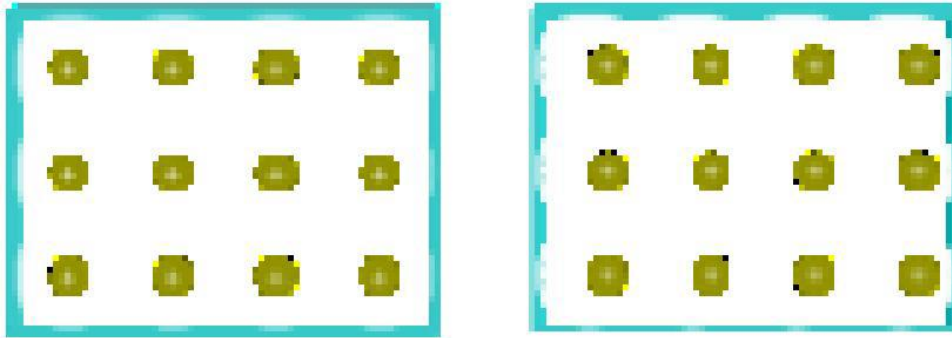
U heterogenních systémů je dominantní polarizace na mezifázovém rozhraní

- d) Mezifázová polarizace – akumulace nosičů náboje na mezifázovém rozhraní u heterogenních systémů. [30]

Podle způsobů při kterých dochází k polarizaci lze dielektrika rozdělit na polární a nepolární.

4.10.2 Nepochární dielektrikum

Nepochární dielektrika jsou složena z molekul a atomů. Jejich vnitřní uspořádání je takové, že všechna těžiště, jak kladných tak záporných části elektrických nábojů vzájemně splývají. Pokud se vyskytne taková částice v elektrickém poli, dochází jeho působením ke vzájemnému posunutí těžiště záporných nábojů vzhledem k těžišti kladných nábojů. Posunutí je do určité vzdálenosti, což způsobuje, že nepolární částice se stává elektrickým dipólem s momentem. To lze vidět na obr. 15. [30] Elektrický dipól se v elektrostatickém poli natočí. Jeho poloha je pak ve směru intenzity vnějšího pole. Polarizaci nepolárních molekul lze označit jako **atomovou** nebo **elektronovou**.

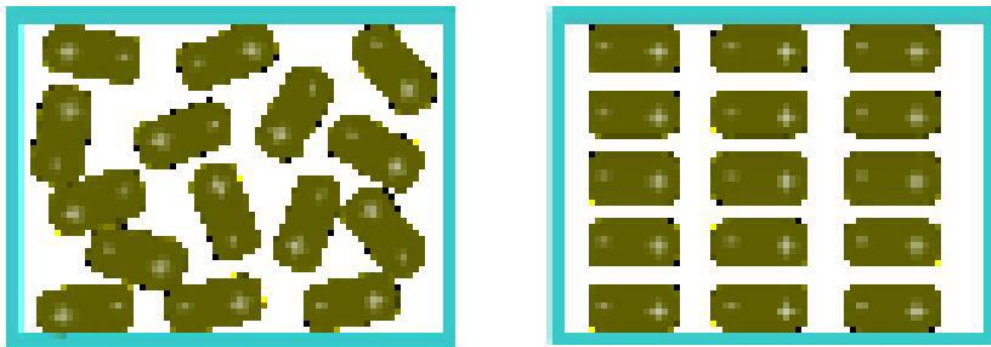


Obr. 15 Nepolární dielektrikum

Mezi dielektrika s nepolárními molekulami lze zařadit např. vodík, dusík nebo kyslík. Indukované momenty nepolárních dielektrik jsou velmi malé, oproti tomu když je srovnáme s vlastními momenty dielektrik polárních.

4.10.3 Polární dielektrikum

Látky polárních dielektrik mají nenulový dipólový moment. Ten je stejný i bez přítomnosti vnějšího elektrického pole. Částice polárního dielektrika jsou tvořené z kladných i záporných iontů. Ve vnějším elektrickém poli se tyto částice natácejí. Natácejí se do směru elektrického pole a dochází k polarizaci dielektrika obr. 16. [30]



Obr. 16 Polární dielektrikum

Tento druh polarizace se označuje jako **iontová polarizace**. Dále ji lze označit jako **orientační polarizace**, neboť polarizace vzniká orientací dielektrika. Mezi dielektrika s molekulami lze zařadit např. voda, amoniak, organické molekul atd. Vlastní dipólové momenty polárních dielektrik jsou o několik řádů větší, než indukované momenty nepolárních dielektrik. Orientační polarizace je závislá na jiných vlivech. Především na tepelném ohybu

částic, nebo na vzájemném působení částic. Toto způsobuje, že polarizace dielektrika není vždy dokonalá. Tzn.že k úplnému natočení všech částic ve směru působícího pole nikdy nedojde. [30]

4.10.4 Heterogenní dielektrikum

V heterogenních materiálech, kterými jsou například kompozity, se vyskytují další typy polarizace. Ta je způsobená akumulací nosičů náboje rozhraní dvou fází o různých hodnotách vodivosti. Tuto polarizaci lze nazvat mezifázovou polarizací. Jelikož žádný materiál není ideálně homogenní, lze tento efekt často pozorovat nejen v případě kompozitů. Příkladem může být semikrystalický materiál, např. polymer. K mezifázové polarizaci může docházet na rozhraní amorfni a krystalické fáze. Tento druh polarizace je dominantní u kompozitů, které obsahují vodivé plnivo. [23]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍL LABORATORNÍCH ZKOUŠEK

V praktické části mé diplomové práce se budu zabývat zkoušením elektrických a mechanických vlastností kompozitního materiálu. Důležitou částí bude pak pozorování změn vlastností materiálu, na základě přidávání % plniva.

V první řadě bude proveden výpočet pro jednotlivé složky, z kterých se výsledný vzorek bude skládat. Následně proběhne výroba vzorků s následným měřením mechanických vlastností a elektrické vodivosti.

Základním materiálem pro výrobu vzorků byla skelná tkanina s gramáží 200g/m², která se prosycovala různými plnivy (matricemi). Jednalo se o pryskyřici Laminating resin L 285 do které se následně přidávaly další plniva (uhlíkové vlákno, grafit, atd.).

Proběhlo měření elektrické vodivosti. Dále pak proběhlo měření mechanických vlastností a to zkouška ohybem a zkouška rázem (Charpyho kladivo).

Výsledné hodnoty se vyhodnotily v tabulkách a grafech.

6 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ

6.1 Materiály

6.1.1 Materiály výztuže

Na výrobu zkušebních vzorků se použila skelná tkanina s gramáží 200g/m² s plátňovou vazbou.



Obr. 17 Skelná tkanina

6.1.2 Epoxidová pryskyřice L 285 (MGS)

Tato kvalitní epoxidová pryskyřice se používá převážně pro letecký průmysl. Pryskyřice je vysoce kvalitní a spolu s tužidlem vytváří velmi viskózní směs, která zaručuje, že jsou vlákna rychle a kvalitně prosycena. Díky tomu má výrobek větší pevnost a nižší hmotnost.

Tab. 3 Laminační pryskyřice L285

Hustota	g / cm ³ / 25 °C	1,18 ÷ 1,23
Viskozita	mPas / 25 °C	600 ÷ 900
Ekvivalent epoxidu	x	165 ÷ 170
Hodnota epoxidu	x	0,59 ÷ 0,65
Barva	Gardner	max 3

Tab. 4 Mechanická data nezesílené pryskyřice

Hustota	g/cm^3	1,18 ÷ 1,20
Pevnost v ohybu	$\text{psi} \times 10^3 \text{ N} / \text{mm}^2$	16 ÷ 18
		110 ÷ 120
Modul pružnosti	$\text{psi} \times 10^3 \text{ kN} / \text{mm}^2$	4,6 ÷ 4,8
		3,0 ÷ 3,3
Pevnost v tahu	$\text{psi} \times 10^3 \text{ kN} / \text{mm}^2$	10 ÷ 11,5
		70 ÷ 80
Pevnost v tlaku	$\text{psi} \times 10^3 \text{ kN} / \text{mm}^2$	18 ÷ 20
kN/mm^2		120 ÷ 140
Průtažnost	%	5 ÷ 6,5
Síla nárazu	Nmm/mm^2	45 ÷ 55
Pevnost ve střihu	D	80 ÷ 85
Absorpce vody %	24 h 23 °C	0,20 ÷ 0,30
		0,60 ÷ 0,80
Odolnost proti únavě pod tlakem na obrácený ohyb dle DLR Brunsw.	10%	> 2 X 10 ⁴
	90%	> 2 X 10 ⁶
Vytvrzení:	24 h při 23 °C	+ 15 h při 60 °C

6.1.3 Ostatní použité přísady

- Odpěňovač BYK – 9076
- Dispergátor BYK - 9810

6.1.4 Plniva kompozitů

- Grafit GP – SV 1
- Wopleé Quartz AS 0712
- Uhlíková vlákna Donacarbo 244S
- Grafit (uhlíkový prach) Cabot black VXC 605

6.2 Příprava zkušebních vzorků

6.2.1 Pomůcky pro výrobu zkušebních vzorků

Pro výrobu zkušebních vzorků (kompozitních desek) je a potřeby tyto věci:

- Forma (skleněná deska)
- Látkový váleček
- Kovový váleček s vroubkou
- Kovová stěrka (špachtle)
- Dřevěné tyčinky
- Plastové kelímky
- Látkové hadry
- Papírové ubrousky
- Tyčový mixér
- Separátor
- Gumové rukavice
- Ochranné pracovní prostředky
- Nůžky
- Laboratorní váha

6.2.2 Příprava formy (skleněné desky) pro nanesení tkaniny

Pro přípravu kompozitních desek jsme zvolili metodu výroby ručním laminováním, která je vhodnou metodou obzvláště z hlediska úspory peněz. Pro přípravu kompozitních desek bylo potřeba si nachystat rovný povrch. K tomuto účelu se použily skleněné desky, které mají po vyčištění lesklý a rovný povrch. Ty se vzaly a důkladně očistily od hrubých nečistot, pomocí škrabky. Dále se pak přešlo k očištění jemných nečistot, pomocí látkové

hadry. Vyčištěná deska byla poté nachystána k následnému separování, které je zapotřebí pro odstranění (odformování) vytvrzených desek.

Separátor se nanášel na skleněné desky látkovým hadříkem. Po nanesení první vrstvy separátoru se nanesená vrstva zaleštila papírovým hadříkem. Toto nanesení jsme na skleněnou desku aplikovali celkem 3x. Nanesená vrstva nám na skleněné desce vytvořila povlak, které je potřeba ke správnému odformování desky (ty se nám díky separátoru nepřilepí).



Obr. 18 Separátor se skleněnou deskou

6.2.3 Příprava tkaniny

Další etapou přípravy vzorků byla příprava tkaniny. Vybrali jsme skelnou tkaninu s gramáží 200g/m² s plátňovou vazbou, kterou jsme si nastříhali na předem zvolené rozměry 20x20cm. Kusů těchto rozměrů jsme si pro každý vzorek připravily pět. Tento rozměr byl postačující pro přípravu vzorků na měření elektrické vodivosti, zkoušky rázem a zkoušky na ohyb.

6.2.4 Příprava plniva

Pro přípravu plniva jsme si vzali nádobku (plastový kelímek) do kterého jsme si navážili množství pryskyřice v poměru 100/27 k celkové hmotnosti navážené tkaniny. Do směsi se přidali také přísady námi určené, v podobě uhlíkových vláken, grafitu aj. Dále se přidal odpěňovač BYK – 9076 a dispergátor BYK – 9810.

6.2.5 Příprava matrice

Pro výpočet množství přidávaných složek jsme použili tabulku. Tuto tabulku, jsme si připravili v programu Microsoft Excel. Do tabulky se zanášeli hodnoty navážené tkaniny a hodnoty % přidávaných plniv.

Tab. 6.5 Tabulka pro výpočet hmotností přísad GR_1

Hmotnost tkaniny (g)	163		
30% hmotnosti tkaniny (g)	48,9		
Celkové množství (g)	211,9		
Rozdělení 100/27	211,9		
Pryskyřice 100	166,9		
Tužidlo 27	35,5		
Množství plniva 5% (g)	10,6	Přísada BYK 9076 (g)	2,1
Množství plniva 10% (g)	21,2	Přísada BYK 9076 (g)	4,2
Množství plniva 15% (g)	31,8	Přísada BYK 9076 (g)	6,4
Množství plniva 20% (g)	42,4	Přísada BYK 9076 (g)	8,5

Po výpočtu všech potřebných informací (hmotností složek) se mohlo přejít k vážení jednotlivých přísad. Jako první se navážila pryskyřice, do které se přimíchalo tužidlo. Dále pak se přidávalo plnivo (např. uhlíkový prachy nebo grafit). V poslední části se přidal ještě odpěňovač BYK-9076.

Poté se přistoupilo k samotnému míchání. Nejdříve se vše promíchalo dřevěnou lopatkou, aby se všechny složky náležitě spojily a poté se přešlo k míchání ručním mixérem, který zaručil potřebné rozmíchání malých hrudek, které během míchání dřevěnými lopatkami vznikly.

6.2.6 Ruční laminace

Již před na začátku před samotným chystáním vzorků, jsme si určili, že z důvodu potřebné tloušťky kompozitní desky bude zapotřebí alespoň pět vrstev tkaniny. S tímto počtem tkaniny a daným obsahem plniva nám vznikly desky o tloušťce 1,5 mm až 2,5 mm. Tloušťka desek se mění v návaznosti na množství plniva v matrici.

Postup ruční laminace probíhal nanesením první vrstvy matrice pomocí válečku na skleněnou desku. Na tu se pak položila první vrstva tkaniny, kterou jsme přejeli kovovým válečkem s vroubky, aby došlo k dobrému prosycení tkaniny. Váleček způsoboval to, že se matrice do tkaniny zatlačí. Dále se pak na první vrstvu tkaniny nanasla opět matrice pomocí válečku a přiložila další vrstva tkaniny, která se opět přejela kovovým válečkem. Tento proces se opakoval u všech pěti vrstev tkaniny. Na závěr se zbytek matrice nanasla na pátou vrstvu tkaniny a opět válečkem prosytil.



Obr. 19 Vrstvy tkaniny bez přísad

Po nanesení všech vrstev tkaniny s matricí se nechá deska vytvrdit (cca 24-36 hodin) a můžeme desku s pomocí špachtle ze skleněné desky odformovat.

6.2.7 Výroba měřících tělísek

Byly připraveny tři druhy tělísek, pro měření elektrické vodivosti, rázové zkoušky a zkoušky ohybem. Na již vytvrzenou kompozitní desku byly rozkresleny tělíška o rozměrech a počtu kusů:

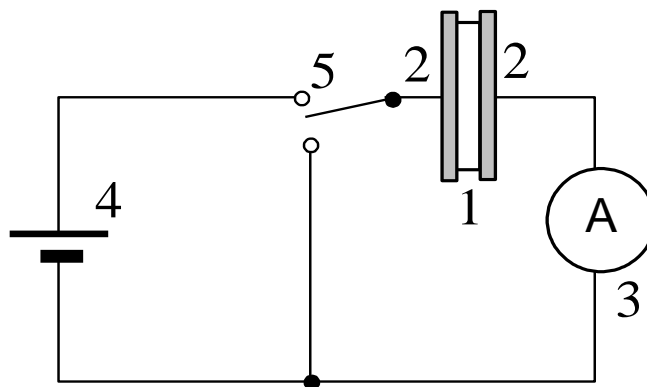
- Elektrická vodivost 3 tělíška (20mm x 20mm)
- Rázová zkouška 5 tělísek (10mm x 50mm)
- Zkouška ohybem 8 tělísek (20mm x 100mm)

Zkušební tělíška byly rozřezány na stojní pásové pile ve firmě Form.

7 ZKOUŠKY ELEKTRICKÉ VODIVOSTI

Při zkoušení elektrické vodivosti a elektrických vlastností byla oslovena fakulta v Trnavě, přesněji řečeno Materiálově-technická fakulta patřící Slovenské technické univerzitě v Bratislavě.

Elektrické vlastnosti se měřily na zařízení Novocontrol concept 90. Měření probíhalo při teplotě 30-150°C.



Obr. 20 Schéma zařízení Novocontrol Concept 90

Zařízení je určené pro měření jednosměrné konduktivity.

1. Vzorek – umístěná mezi elektrodami
2. Měřící elektrody – zapojené do obvodu
3. Pikoampérmetr
4. Zdroj vysokého napětí
5. Přepínač – slouží o dstranění přebytečného náboje na povrchu elektrod

Hodnota elektrické konduktivity se určí pomocí vztahu:

$$\sigma = \frac{I}{U_p} \cdot \frac{d}{S} \quad (23)$$

Kde: U_p – velikost připojeného napětí (V)

I – velikost proudu (A)

d – tloušťka vzorku (mm)

S – průřez vzorku (cm²)

7.1 Měřicí přístroj Novocontrol concept 90



Obr. 21 Měřicí přístroj Novocontrol concept 90

Při měření je zapotřebí použít do oběhu plynný dusík. Ten slouží pro regulaci teploty a vzniká odpařením kapalného dusíku. Jako izolace proti tepelným ztrátám slouží vakuum o velikosti 0,001 Bar. To odděluje měřicí buňku, v které je umístěný měřený vzorek od okolí. Celý systém automaticky řídí množství dusíku a také jeho přehřívání. Díky tomu můžeme regulovat teplotu v rozmezí 160 °C do 500°C s rychlostí ohřevu $-40^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ až do $40^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$.



Obr. 22 Měřicí buňka

8 ZKOUŠKA RÁZEM

Jednalo se o tzv. mechanickou zkoušku rázem v ohybu (zkouška na Charpyho kladi-
vu). Zkouška se prováděla na stroji Resil Impactor Junior od firmy CEAST.

Zkušební těleso o předem určených rozměrech je umístěno v podpěrách. Mezi dvěma
podpěrami (tzn. středem osy tělesa) dochází k namáhání kolmému k přímce rázu a to vysou-
kou, konstantní rychlostí. Během měření, tzn. během působení rázu, se zaznamenává rázo-
vá síla, působící na tělísko.

Výsledkem měření je křivka síly a průhybu, který popisuje chování zkušebního tělesa
při rázovém ohybovém namáhání. Z tohoto měření lze odvodit některé vlastnosti materiálu.



Obr. 23 Charpyho kladio (stroj Resil Impactor Junior)

9 ZKOUŠKA OHYBEM

Jednalo se o tzv. mechanickou zkoušku, zkouška ohybem. Zkouška se prováděla na stroji Zwick 1456.

Zkušební těleso o předem určených rozměrech je umístěno v podpěrách. Mezi dvěma podpěrami (tzn. středem osy tělesa) dochází k namáhání kolmém na těleso a to tlačnou silou. Během měření, tzn. během působení síly, se zaznamenávají údaje a vykreslují do grafu.

Výsledkem měření je vyhodnocení parametrů modulu pružnosti a meze pevnosti.



Obr. 24 Přístroj Zwick 145 665

10 VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY ELEKTRICKÉ VODIVOSTI

Hlavní měřením bylo měření elektrické vodivosti zkušebních vzorků. Vzorky byly postupně ohřívány od 30 °C do 150 °C. Vzorky byly měřeny při jednosměrném napětí 1V s rychlostí ohřevu 5 °C/min.

Pro vyhodnocování se používaly tyto statistické funkce:

- T – teplota (°C, K)
- I - proud (A)
- σ - vodivost (S/m)

Vzorky byly označeny následovně:

- BEZ – bez použití přísad
- UV – uhlíková vlákna
- AS – AS Woplée Quartz AS 0712
- GR – grafit GP – SV 1
- GR_1 – grafit_1

10.1 Bez přísad

Tab. 6 Vyhodnocení vzorku BEZ

Bez přísad			
Teplota	Proud	Převrácená hodnota teploty	Vodivost
°C	A	1000/K	S/m
30	4,31E-14	3,2987	1,92E-13
40	-1,77E-14	3,19336	-7,86E-14
50	-5,53E-15	3,09454	-2,46E-14
60	5,01E-14	3,00165	2,23E-13
70	1,83E-13	2,91418	8,12E-13
80	4,95E-13	2,83166	2,20E-12
90	1,93E-12	2,75368	8,57E-12
100	8,51E-12	2,67989	3,78E-11
110	3,36E-11	2,60994	1,50E-10
120	1,10E-10	2,54356	4,90E-10
130	3,17E-10	2,48047	1,41E-09
140	8,18E-10	2,42043	3,64E-09

150	1,77E-09	2,36323	7,89E-09
-----	----------	---------	----------



Obr. 25 Závislost vodivosti na teplotě - BEZ



Obr. 26 Závislost proudu na teplotě - BEZ

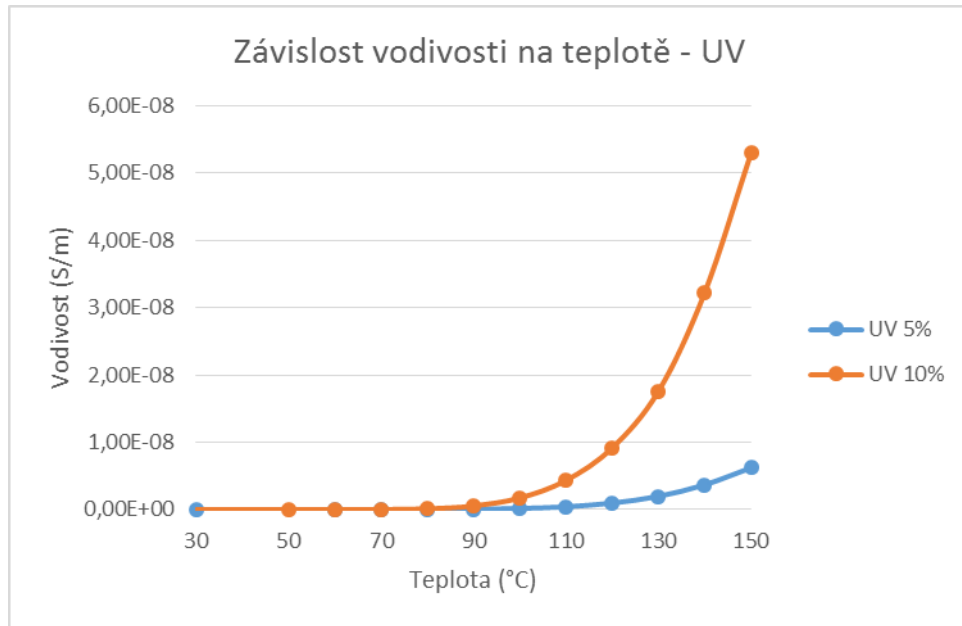
10.2 Uhlíkové vlákna

Tab. 7 Vyhodnocení vzorku UV 5%

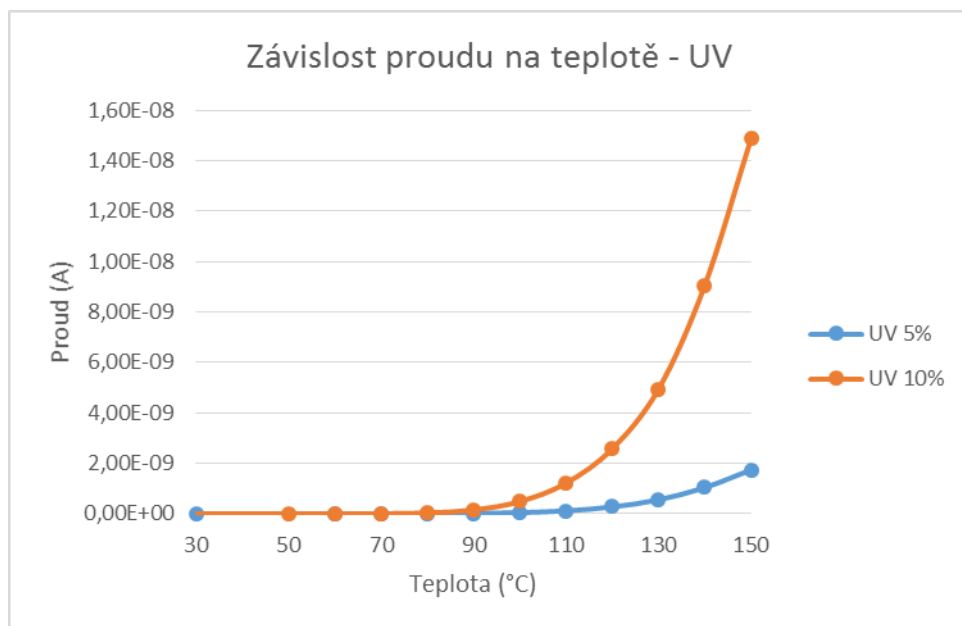
Uhlíková vlákna 5%			
Teplota	Proud	Převrácená hodnota teploty	Vodivost
°C	A	1000/K	S/m
30	1,94E-12	3,2987	6,90E-12
40	-5,24E-14	3,19336	-1,86E-13
50	-3,92E-14	3,09454	-1,39E-13
60	2,13E-14	3,00165	7,59E-14
70	4,46E-13	2,91418	1,59E-12
80	2,69E-12	2,83166	9,57E-12
90	1,35E-11	2,75368	4,81E-11
100	4,71E-11	2,67989	1,67E-10
110	1,20E-10	2,60994	4,26E-10
120	2,74E-10	2,54356	9,74E-10
130	5,54E-10	2,48047	1,97E-09
140	1,04E-09	2,42043	3,69E-09
150	1,74E-09	2,36323	6,20E-09

Tab. 8 Vyhodnocení vzorku UV 10%

Uhlíková vlákna 10%			
Teplota	Proud	Převrácená hodnota teploty	Vodivost
°C	A	1000/K	S/m
30	-8,00E-14	3,2987	-2,85E-13
40	-6,13E-14	3,19336	-2,18E-13
50	9,41E-15	3,09454	3,35E-14
60	5,46E-13	3,00165	1,94E-12
70	4,46E-12	2,91418	1,59E-11
80	3,18E-11	2,83166	1,13E-10
90	1,52E-10	2,75368	5,40E-10
100	4,86E-10	2,67989	1,73E-09
110	1,22E-09	2,60994	4,34E-09
120	2,58E-09	2,54356	9,18E-09
130	4,95E-09	2,48047	1,76E-08
140	9,06E-09	2,42043	3,23E-08
150	1,49E-08	2,36323	5,29E-08



Obr. 27 Závislost vodivosti na teplotě - UV



Obr. 28 Závislost proudu na teplotě - UV

10.3 AS Woplé

Tab. 9 Vyhodnocení vzorku AS 5%

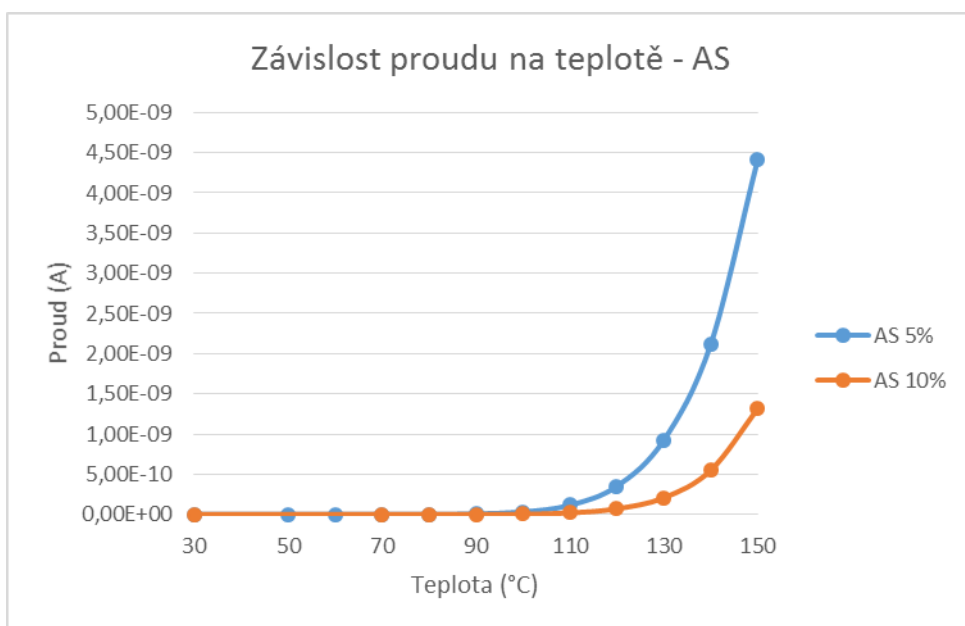
AS Woplé 5%			
Teplota	Proud	Převrácená hodnota teploty	Vodivost
°C	A	1000/K	S/m
30	1,20E-13	3,2987	5,30E-13
40	-1,78E-14	3,19336	-7,85E-14
50	-1,00E-16	3,09454	-4,41E-16
60	7,85E-14	3,00165	3,46E-13
70	3,59E-13	2,91418	1,58E-12
80	1,65E-12	2,83166	7,28E-12
90	8,15E-12	2,75368	3,60E-11
100	3,27E-11	2,67989	1,44E-10
110	1,16E-10	2,60994	5,10E-10
120	3,50E-10	2,54356	1,54E-09
130	9,23E-10	2,48047	4,07E-09
140	2,11E-09	2,42043	9,33E-09
150	4,41E-09	2,36323	1,94E-08

Tab. 10 Vyhodnocení vzorku AS 10%

AS Woplé 10%			
Teplota	Proud	Převrácená hodnota teploty	Vodivost
°C	A	1000/K	S/m
30	1,11E-12	3,2987	6,20E-12
40	-5,10E-14	3,19336	-2,84E-13
50	-4,06E-14	3,09454	-2,27E-13
60	-3,13E-14	3,00165	-1,74E-13
70	2,90E-14	2,91418	1,62E-13
80	2,10E-13	2,83166	1,17E-12
90	8,02E-13	2,75368	4,48E-12
100	4,37E-12	2,67989	2,44E-11
110	2,00E-11	2,60994	1,12E-10
120	7,14E-11	2,54356	3,99E-10
130	2,07E-10	2,48047	1,16E-09
140	5,48E-10	2,42043	3,06E-09
150	1,31E-09	2,36323	7,33E-09



Obr. 29 Závislost vodivosti na teplotě – AS



Obr. 30 Závislost proudu na teplotě – AS

10.4 Grafit

Tab. 11 Vyhodnocení vzorku GR 5%

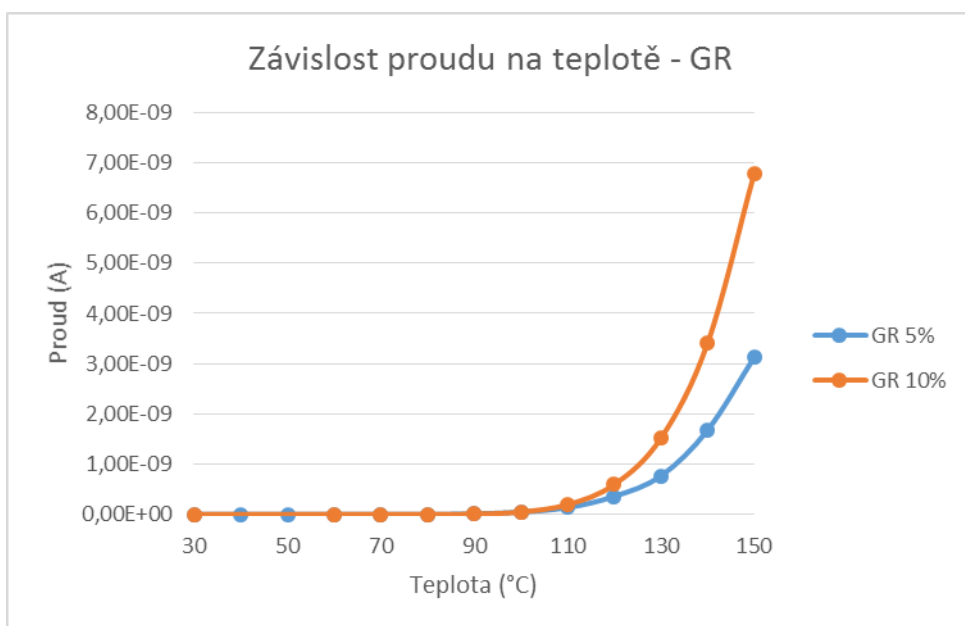
Grafit 5%			
Teplota	Proud	Převrácená hodnota teploty	Vodivost
°C	A	1000/K	S/m
30	1,03E-14	3,2987	4,91E-14
40	1,99E-14	3,19336	9,53E-14
50	7,14E-14	3,09454	3,42E-13
60	2,67E-13	3,00165	1,28E-12
70	7,49E-13	2,91418	3,59E-12
80	3,43E-12	2,83166	1,64E-11
90	1,47E-11	2,75368	7,04E-11
100	4,90E-11	2,67989	2,35E-10
110	1,38E-10	2,60994	6,62E-10
120	3,62E-10	2,54356	1,74E-09
130	7,69E-10	2,48047	3,69E-09
140	1,68E-09	2,42043	8,05E-09
150	3,13E-09	2,36323	1,50E-08

Tab. 12 Vyhodnocení vzorku GR 10%

Grafit 10%			
Teplota	Proud	Převrácená hodnota teploty	Vodivost
°C	A	1000/K	S/m
30	1,60E-13	3,2987	8,83E-13
40	-4,17E-14	3,19336	-2,30E-13
50	-4,04E-14	3,09454	-2,23E-13
60	1,61E-13	3,00165	8,88E-13
70	8,11E-13	2,91418	4,47E-12
80	2,21E-12	2,83166	1,22E-11
90	9,84E-12	2,75368	5,43E-11
100	5,11E-11	2,67989	2,82E-10
110	1,97E-10	2,60994	1,09E-09
120	5,97E-10	2,54356	3,29E-09
130	1,52E-09	2,48047	8,40E-09
140	3,41E-09	2,42043	1,88E-08
150	6,79E-09	2,36323	3,74E-08



Obr. 31 Závislost vodivosti na teplotě - GR



Obr. 32 Závislost proudu na teplotě - GR

10.5 Grafit_1

Tab. 13 Vyhodnocení vzorku GR_1 5%

Grafit_1 5%			
Teplota	Proud	Převrácená hodnota teploty	Vodivost
°C	A	1000/K	S/m
30	-8,60E-13	3,2987	-3,67E-12
40	-2,96E-15	3,19336	-1,26E-14
50	6,38E-15	3,09454	2,73E-14
60	3,67E-14	3,00165	1,57E-13
70	1,68E-13	2,91418	7,17E-13
80	9,11E-13	2,83166	3,89E-12
90	4,87E-12	2,75368	2,08E-11
100	2,37E-11	2,67989	1,01E-10
110	9,38E-11	2,60994	4,01E-10
120	2,95E-10	2,54356	1,26E-09
130	7,62E-10	2,48047	3,26E-09
140	1,70E-09	2,42043	7,24E-09
150	3,44E-09	2,36323	1,47E-08

Tab. 14 Vyhodnocení vzorku GR_1 10%

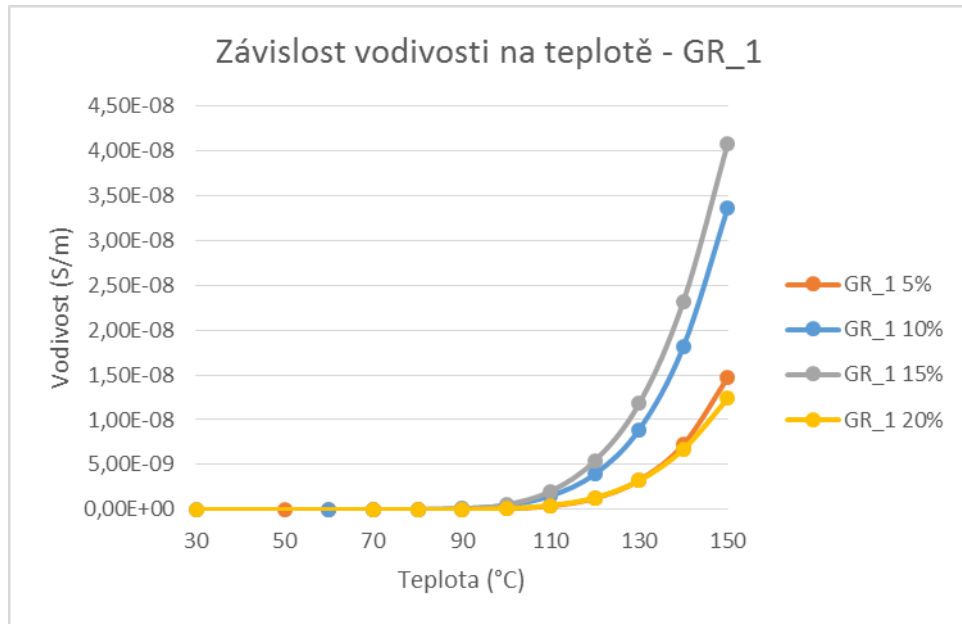
Grafit_1 10%			
Teplota	Proud	Převrácená hodnota teploty	Vodivost
°C	A	1000/K	S/m
30	8,60E-13	3,2987	4,01E-12
40	-2,38E-14	3,19336	-1,11E-13
50	-1,12E-14	3,09454	-5,24E-14
60	3,91E-14	3,00165	1,82E-13
70	4,92E-13	2,91418	2,29E-12
80	3,76E-12	2,83166	1,75E-11
90	2,40E-11	2,75368	1,12E-10
100	1,02E-10	2,67989	4,77E-10
110	3,29E-10	2,60994	1,53E-09
120	8,48E-10	2,54356	3,96E-09
130	1,91E-09	2,48047	8,90E-09
140	3,89E-09	2,42043	1,82E-08
150	7,20E-09	2,36323	3,36E-08

Tab. 15 Vyhodnocení vzorku GR_1 15%

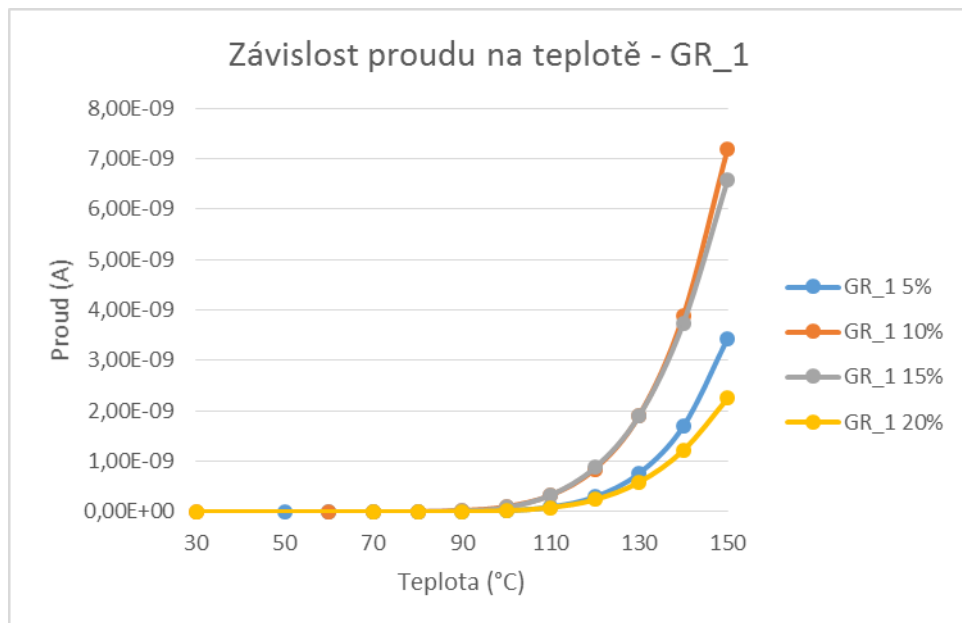
Grafit_1 15%			
Teplota	Proud	Převrácená hodnota teploty	Vodivost
°C	A	1000/K	S/m
30	-3,70E-13	3,2987	-2,29E-12
40	-1,31E-13	3,19336	-8,12E-13
50	-1,32E-13	3,09454	-8,17E-13
60	-1,16E-13	3,00165	-7,18E-13
70	1,39E-13	2,91418	8,59E-13
80	2,03E-12	2,83166	1,26E-11
90	1,59E-11	2,75368	9,84E-11
100	8,65E-11	2,67989	5,35E-10
110	3,29E-10	2,60994	2,04E-09
120	8,76E-10	2,54356	5,43E-09
130	1,91E-09	2,48047	1,18E-08
140	3,75E-09	2,42043	2,32E-08
150	6,58E-09	2,36323	4,08E-08

Tab. 16 Vyhodnocení vzorku GR_1 20%

Grafit_1 20%			
Teplota	Proud	Převrácená hodnota teploty	Vodivost
°C	A	1000/K	S/m
30	6,90E-13	3,2987	3,80E-12
40	-4,59E-14	3,19336	-2,53E-13
50	-3,81E-14	3,09454	-2,10E-13
60	-1,15E-14	3,00165	-6,30E-14
70	1,01E-13	2,91418	5,56E-13
80	8,06E-13	2,83166	4,44E-12
90	4,85E-12	2,75368	2,67E-11
100	2,16E-11	2,67989	1,19E-10
110	8,34E-11	2,60994	4,59E-10
120	2,40E-10	2,54356	1,32E-09
130	5,88E-10	2,48047	3,23E-09
140	1,22E-09	2,42043	6,71E-09
150	2,25E-09	2,36323	1,24E-08

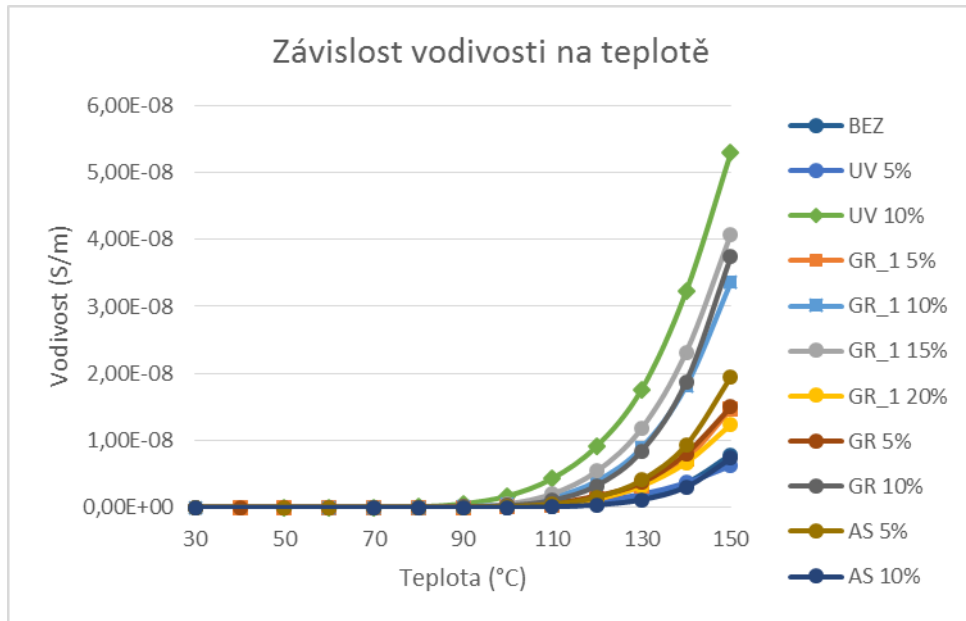


Obr. 33 Závislost vodivosti na teplotě - GR_1

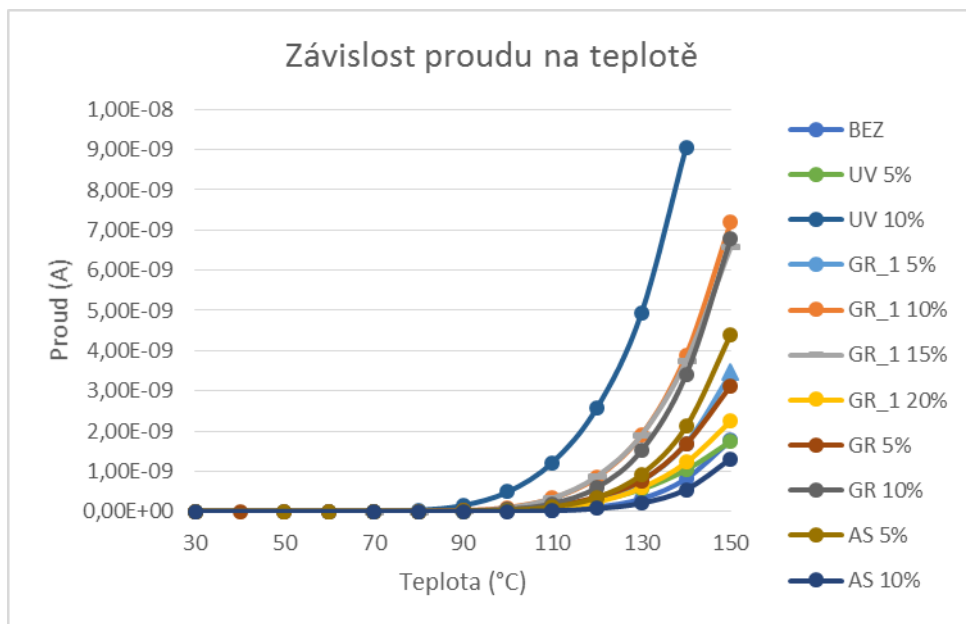


Obr. 34 Závislost proudu na teplotě - GR_1

10.6 Závěrečné vyhodnocení



Obr. 35 Závislost vodivosti na teplotě - celková



Obr. 36 Závislost proudu na teplotě - celková

Při měření elektrických vlastností vzorků probíhalo měření od 30°C do 150°C při stejnosměrném napětí 1 V.

Při určování velikosti vodivosti v závislosti na teplotě bylo zjištěno, že vodivost se u kompozitních materiálů objevuje až od určité teploty. Převážně se vodivost začala objevovat při 100°C.

Pokud vezmeme v potaz, jednotlivé přísady a množství přísad tak vidíme, že nejnižší vodivost má materiál bez přísad 0%. U uhlíkových vláken bylo zjištěno, že s přibývajícím % plniva stoupá vodivost. U vzorku AS Woplé vidíme, že s 10% plniva je elektrická vodivost nižší, jak s 5% plniva. U grafitu vodivost s % plnivy také stoupá, jako u vzorků UV. U vzorků GR_1 vyšla největší vodivost u vzorku GR_1 15% a nejnižší u vzorku GR_1 20%. Tato nepřesnost mohla být způsobena špatnou distribucí plniva při výrobě vzorků.

U velikosti proudu v závislosti na teplotě nám s nejvyššími hodnotami vyšel vzorek UV 10%, přičemž nejmenší proud je u vzorku bez přísad (BEZ).

11 VYHODNOCENÍ MECHANICKÉ ZKOUŠKY – ZKOUŠKA RÁZEM (CHARPYHO KLADIVO)

Jako další se dělala mechanická zkouška a to zkouška rázem. Zkouška probíhala v laboratorních prostorách Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně. Použit byl přístroj Resil Impactor Junior od společnosti Ceast, tzv. Charpyho kladivo, na kterém se proměřily všechny vzorky s různými matricemi.

Pro vyhodnocování se používaly tyto statistické funkce:

- F_m – maximální síla
- A_m – rázová houževnatost k maximální síle
- A_b – celková houževnatost (až do přelomení)

Pro vyhodnocování se používaly tyto statistické funkce:

- \bar{x} – aritmetický průměr
- s – směrodatná odchylka
- v – variační koeficient

Vzorky byly označeny následovně:

- BEZ – bez použití přísad
- UV – uhlíková vlákna
- AS – AS Woplée Quartz AS 0712
- GR – grafit GP – SV 1
- GR_1 – grafit_1

11.1 Bez přísad

Tab. 17 Vyhodnocení vzorku BEZ

Vzorek č.1 - BEZ			
Měření č.	Fm (N)	Am (KJ/m2)	Ab (KJ/m2)
1	393,24	31,09	52,24
2	375,59	29,18	44,62
3	646,58	42,07	42,98
4	465,08	52,60	72,67
5	410,88	45,32	45,93
x	458,27	40,05	51,69
s	98,81	8,81	10,95

11.2 Uhlíková vlákna 5%

Tab. 18 Vyhodnocení vzorku UV 5%

Vzorek č.2 - UV 5%			
Měření č.	Fm (N)	Am (KJ/m2)	Ab (KJ/m2)
1	379,37	48,97	101,81
2	394,50	87,93	152,04
3	447,44	59,37	118,58
4	369,29	51,40	90,31
5	379,37	48,97	101,81
x	393,99	59,33	112,91
s	27,91	14,80	21,54

11.3 Uhlíková vlákna 10%

Tab. 19 Vyhodnocení vzorku UV 10%

Vzorek č.3 - UV 10%			
Měření č.	Fm (N)	Am (KJ/m2)	Ab (KJ/m2)
1	409,62	87,81	197,05
2	409,62	87,81	197,05
3	375,59	46,94	140,06
4	390,72	77,16	123,49
5	375,59	46,94	140,06
x	392,23	69,33	159,54
s	15,24	18,69	31,22

11.4 AS 5%

Tab. 20 Vyhodnocení vzorku AS 5%

Vzorek č.4 - AS 5%			
Měření č.	Fm (N)	Am (KJ/m ²)	Ab (KJ/m ²)
1	327,70	64,05	95,40
2	330,22	63,02	162,43
3	240,73	16,47	115,96
4	327,70	60,89	129,00
5	238,21	25,49	83,26
x	292,91	45,98	117,21
s	43,65	20,64	27,62

11.5 AS 10%

Tab. 21 Vyhodnocení vzorku AS 10%

Vzorek č.5 - AS 10%			
Měření č.	Fm (N)	Am (KJ/m ²)	Ab (KJ/m ²)
1	334,00	64,40	180,79
2	409,62	90,12	164,23
3	381,90	31,28	159,89
4	346,60	32,53	200,66
5	247,03	68,40	152,00
x	343,83	57,35	171,51
s	55,23	22,54	17,35

11.6 Grafit 5%

Tab. 22 Vyhodnocení vzorku GR 5%

Vzorek č.6 - GR 5%			
Měření č.	Fm (N)	Am (KJ/m ²)	Ab (KJ/m ²)
1	301,23	38,83	129,92
2	276,02	20,64	136,55
3	379,37	44,64	143,80
4	449,96	48,00	181,40
5	334,00	49,19	139,04
x	348,12	40,26	146,14
s	61,55	10,45	18,19

11.7 Grafit 10%

Tab. 23 Vyhodnocení vzorku GR 10%

Vzorek č.7 - GR 10%			
Měření č.	Fm (N)	Am (KJ/m2)	Ab (KJ/m2)
1	570,95	42,91	153,79
2	412,14	122,92	244,13
3	422,23	41,95	173,44
4	341,56	70,07	182,41
x	436,72	69,46	188,44
s	83,50	32,86	33,78

11.8 Grafit_1 5%

Tab. 24 Vyhodnocení vzorku GR_1 5%

Vzorek č.8 - GR_1 5%			
Měření č.	Fm (N)	Am (KJ/m2)	Ab (KJ/m2)
1	293,67	77,48	96,99
2	340,30	73,27	86,24
3	332,74	86,45	106,97
4	328,96	84,08	100,28
5	360,47	85,29	115,92
x	331,23	81,31	101,28
s	21,70	5,08	9,92

11.9 Grafit_1 10%

Tab. 25 Vyhodnocení vzorku GR_1 10%

Vzorek č.9 - GR_1 10%			
Měření č.	Fm (N)	Am (KJ/m2)	Ab (KJ/m2)
1	346,60	20,04	52,22
2	374,33	27,54	54,28
3	368,03	22,30	39,60
4	347,87	24,15	44,03
5	452,48	35,97	43,60
x	377,86	26,00	46,75
s	38,87	5,56	5,57

11.10 Grafit_1 15%

Tab. 26 Vyhodnocení vzorku GR_1 15%

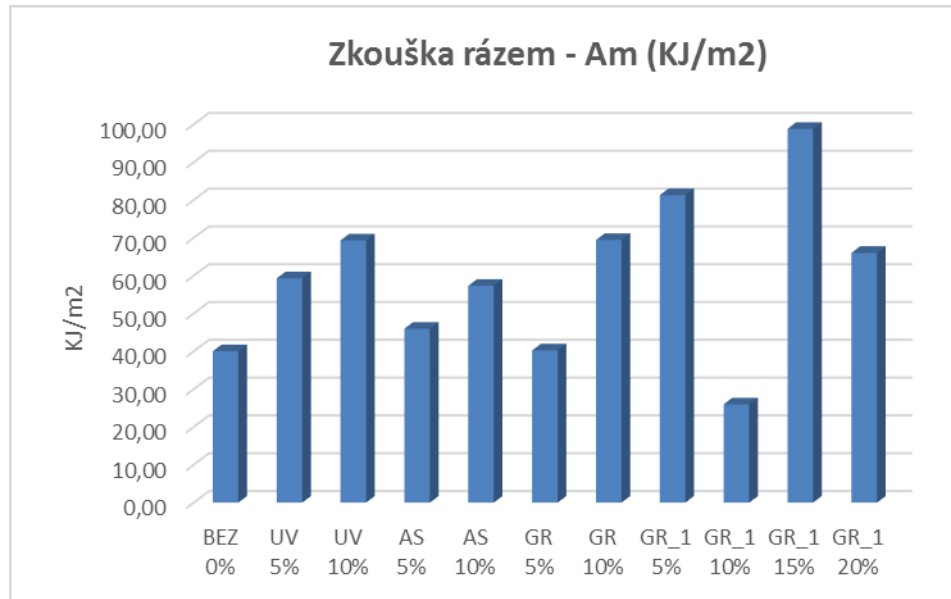
Vzorek č.10 - GR_1 15%			
Měření č.	Fm (N)	Am (KJ/m2)	Ab (KJ/m2)
1	613,81	128,96	166,08
2	762,53	129,63	178,80
3	588,60	67,48	123,26
4	627,67	75,82	169,25
5	696,99	92,37	147,81
x	657,92	98,85	157,04
s	63,46	26,12	19,65

11.11 Grafit_1 20%

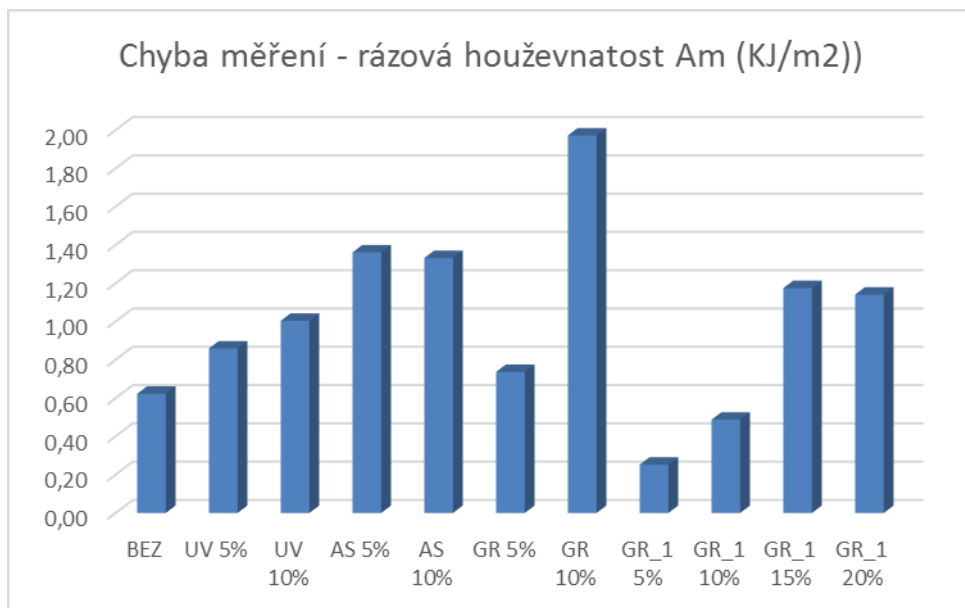
Tab. 27 Vyhodnocení vzorku GR_1 20%

Vzorek č.11 - GR_1 20%			
Měření č.	Fm (N)	Am (KJ/m2)	Ab (KJ/m2)
1	569,69	67,45	123,67
2	477,68	56,80	192,46
3	524,32	72,08	168,30
4	476,42	35,17	149,73
5	543,22	98,76	100,68
x	518,27	66,05	146,97
s	36,61	20,72	32,30

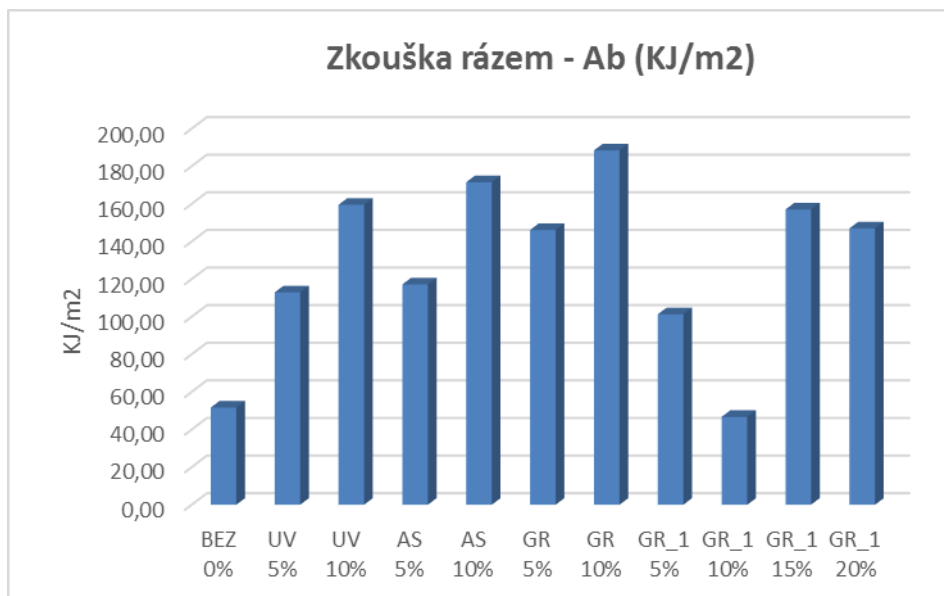
11.12 Závěrečné vyhodnocení



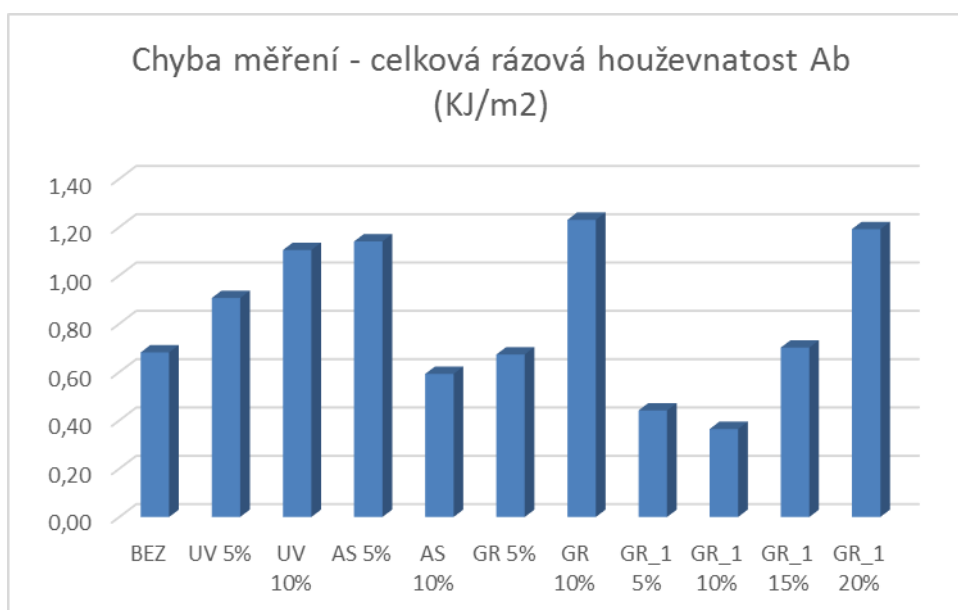
Obr. 37 Rázová houževnatost – Am



Obr. 38 Chyba měření – rázová houževnatost Am



Obr. 39 Celková rázová houževnatost – Ab



Obr. 40 Chyba měření – celková rázová houževnatost Ab

Po provedení zkoušky rázem jsme zjistili, že největší rázovou houževnatost má vzorek GR_1 15%, přičemž celkovou rázovou houževnatost má největší vzorek GR 10%.

Z naměřených hodnot dále lze usoudit, že ve většině případu se velikost houževnatosti zvyšuje přidáním % plniva. Toto neplatí u vzorků GR_1, kde nejnižší hodnotu má vzorek s 10%. Naopak nejvyšší vzorek s 15%. Toto měření může být zkresleno špatnou distribucí plniva.

12 VYHODNOCENÍ MECHANICKÉ ZKOUŠKY – ZKOUŠKA OHYBEM

Jako další se dělala mechanická zkouška a to zkouška ohybem. Zkouška probíhala v laboratorních prostorách Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně. Použit byl univerzální zkušební stroj Zwick 145 665, na kterém se proměřily všechny vzorky s různými matricemi.

V této zkoušce byly sledovány tyto parametry:

- E – modul pružnosti
- σ_m – mez pevnosti
- F – ohybová síla
- ϵ – poměrná deformace při mezi pevnosti
- W to F_m – spotřebovaná energie
- W to break – energie potřebná k porušení vzorku

Dalšími parametry jsou parametry samotných vzorků:

- a - tloušťka
- b – šířka vzorku
- S – plocha průřezu vzorku

Pro vyhodnocování se používaly tyto statistické funkce:

- x – aritmetický průměr
- s- směrodatná odchylka
- v –variační koeficient

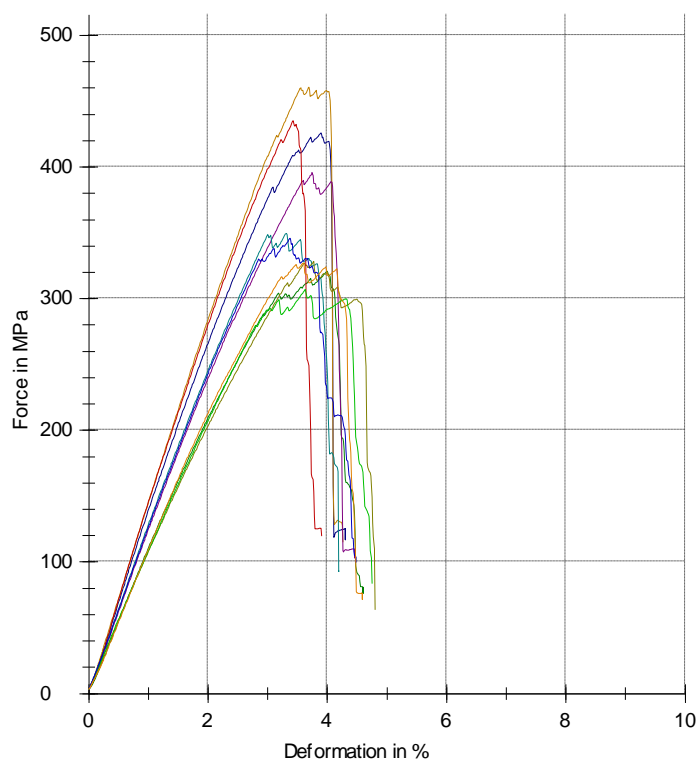
Vzorky byly označeny následovně:

- BEZ – bez použití přísad
- UV – uhlíková vlákna
- AS – AS Woplée Quartz AS 0712
- GR – grafit GP – SV 1
- GR_1 – grafit_1

12.1 Bez přísad

Tab. 12.1 Vyhodnocení vzorku BEZ

BEZ	E	σ_m	F	ϵ	W to Fm	a	b	S
n=10	MPa	MPa	MPa	%	Nmm	mm	mm	mm ²
1	10400	291	321	4	887,71	1,65	19,5	32,18
2	12800	400	426	3,9	1092,02	1,65	19,4	32,01
3	13800	452	461	3,7	1014,26	1,65	18,4	30,36
4	11200	393	396	3,7	876,99	1,65	18,4	30,36
5	12100	347	350	3,3	713,91	1,65	18,5	30,53
6	10100	290	328	3,8	747,15	1,65	18,2	30,03
7	12400	415	435	3,4	860,73	1,65	18,2	30,03
8	10700	280	307	3,6	694,67	1,65	18,1	29,87
9	11700	334	346	3,4	730,03	1,65	18,6	30,69
10	9350	321	327	3,6	721,94	1,65	18,6	30,69
x	11400	352	370	3,6	833,94	1,65	18,59	30,67
s	1370	59,8	55	0,2	137,14	0	0,4841	0,8
v	11,96	16,98	14,88	6,16	16,44	0	2,6	2,6

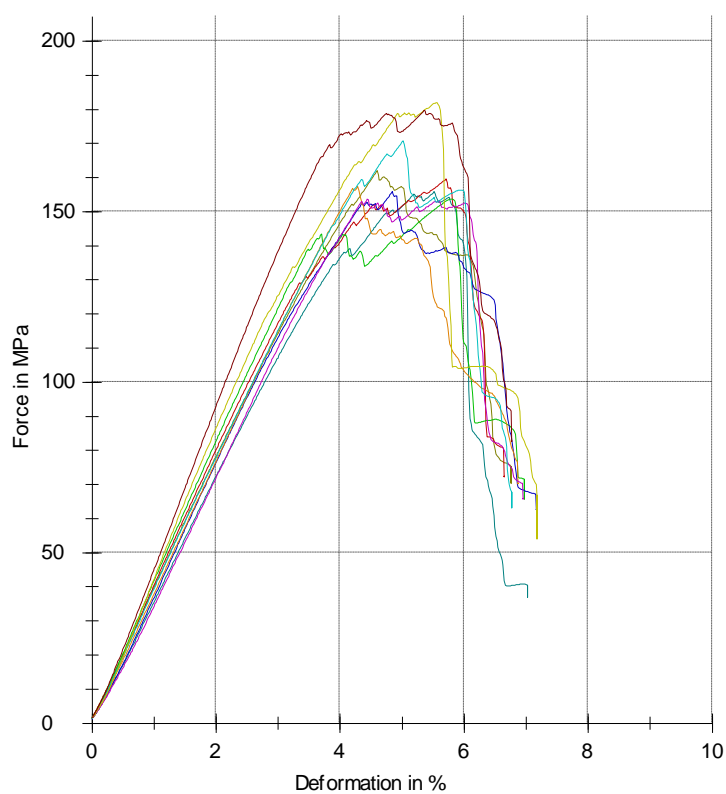


Obr. 41 Závislost mezi napětím a poměrnou deformací BEZ

12.2 Uhlíková vlákna 5%

Tab. 12.2 Vyhodnocení vzorku UV 5%

UV 5%	E	σ_m	F	ϵ	W to Fm	a	b	S
n=10	MPa	MPa	MPa	%	Nmm	mm	mm	mm ²
1	3030	155	156	5,5	746,04	2,4	17,2	41,28
2	3660	161	162	4,6	607,02	2,4	17,8	42,72
3	3350	151	160	5,7	899,11	2,4	18,5	44,4
4	3420	137	154	5,8	892,69	2,4	18,1	43,44
5	2990	145	156	4,8	751,43	2,4	20,7	49,68
6	3280	143	157	4,3	620,36	2,4	20,8	49,92
7	2780	152	154	4,4	570,55	2,4	18,9	45,36
8	3390	166	171	5	781,25	2,4	19,4	46,56
9	3000	166	182	5,5	921,23	2,4	18	43,2
10	3600	173	180	5,4	925,69	2,4	18	43,2
x	3250	155	163	5,1	771,54	2,4	18,74	44,98
s	290	11,6	10,6	0,5	136,87	0	1,219	2,92
v	8,91	7,48	6,51	10,75	17,74	0	6,5	6,5

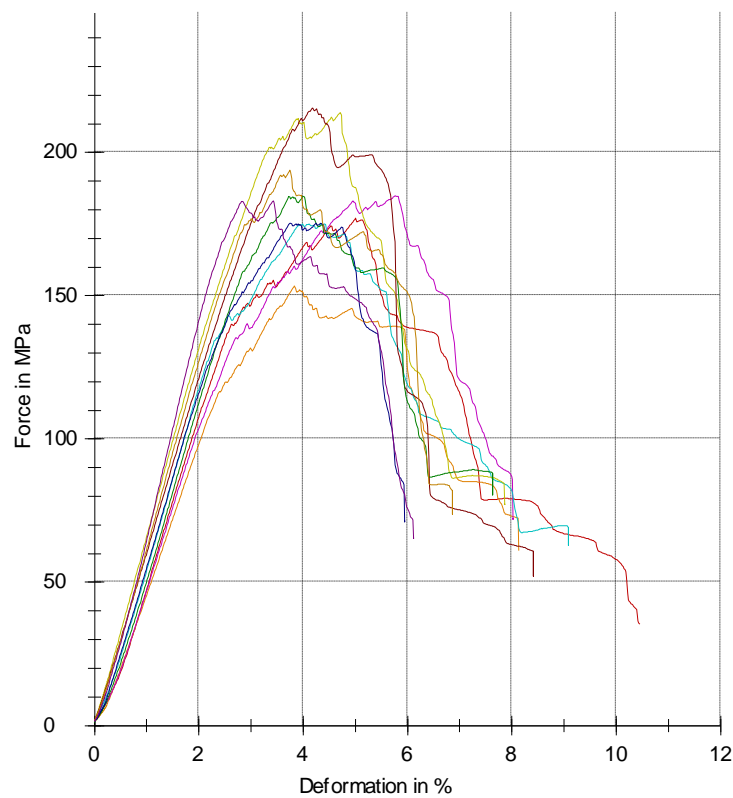


Obr. 42 Závislost mezi napětím a poměrnou deformací UV 5%

12.3 Uhlíková vlákna 10%

Tab. 12.3 Vyhodnocení vzorku UV 10%

UV 10%	E	σ_m	F	ϵ	W to Fm	a	b	S
n=10	MPa	MPa	MPa	%	Nmm	mm	mm	mm ²
1	2960	156	177	5	843,99	2,4	17,7	42,48
2	2620	139	153	3,8	595,03	2,4	21,2	50,88
3	2840	168	185	5,8	1090,96	2,4	18,6	44,64
4	3980	171	175	4,4	760,19	2,4	18,8	45,12
5	5880	205	214	4,7	954,32	2,4	17,4	41,76
6	5530	211	216	4,2	734,97	2,4	17	40,8
7	3380	161	185	4	673	2,4	18,8	45,12
8	3680	170	175	3,7	588,17	2,4	18,5	44,4
9	5380	193	194	3,7	659,76	2,4	18,5	44,4
10	5040	172	183	3,4	621,71	2,4	19,3	46,32
x	4000	174	187	4,3	755,88	2,4	18,6	44,64
s	1260	27,9	30,1	0,7	150,82	0	1,328	3,19
v	31,51	16,02	16,08	17	19,95	0	7,14	7,14

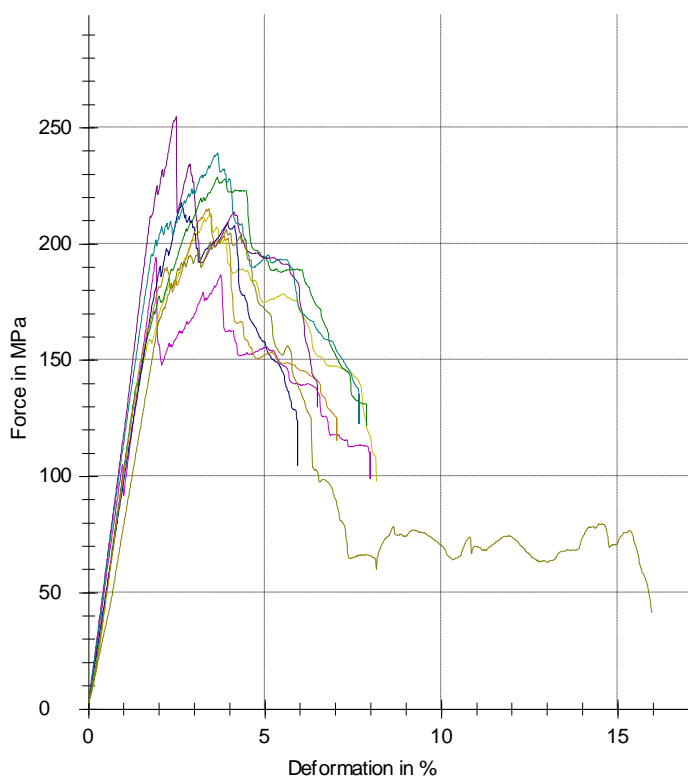


Obr. 43 Závislost mezi napětím a poměrnou deformací UV 10%

12.4 AS Woplé Quartz 5%

Tab. 12.4 Vyhodnocení vzorku AS 5%

AS 5%	E	σ_m	F	ϵ	W to Fm	a	b	S
n=10	MPa	MPa	MPa	%	Nmm	mm	mm	mm ²
1	10300	182	194	1,9	193,2	1,65	17,6	29,04
2	7040	205	213	3,5	524,88	1,65	18,9	31,19
3	8340	195	229	3,6	556,81	1,65	17,8	29,37
4	9370	196	218	2,6	337,69	1,65	17,8	29,37
5	7950	183	215	3,4	512,97	1,65	18,5	30,53
6	11500	240	255	2,5	386,09	1,65	18,5	30,53
7	11200	202	239	3,7	657,1	1,65	19	31,35
8	6700	195	206	3,9	579,35	1,65	18,8	31,02
x	7310	161	179	3,3	502,01	1,65	106,6	175,95
s	4020	82,3	91,1	0,7	152,64	0	186,3	307,47
v	55,01	51,05	50,96	21,9	30,41	0	174,75	174,75

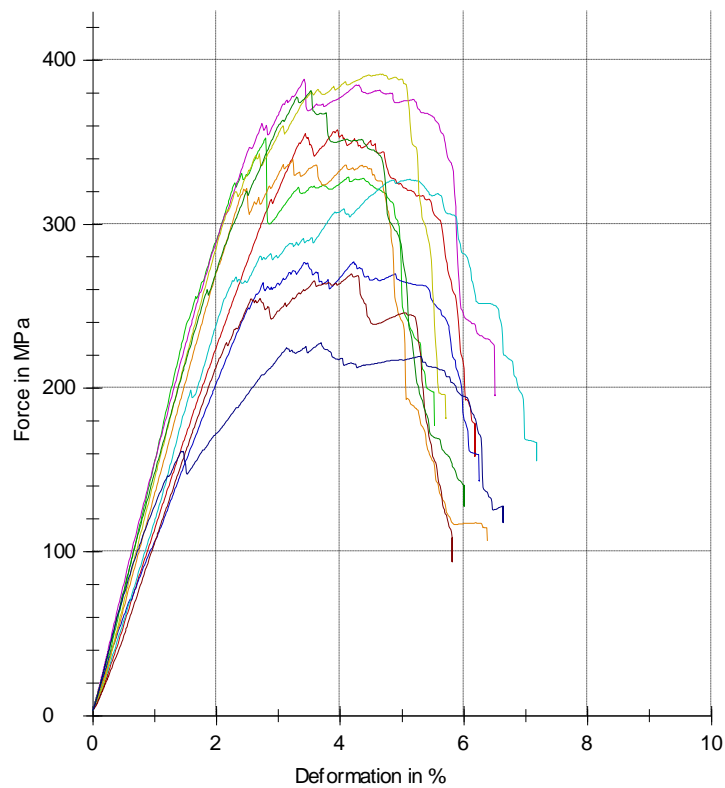


Obr. 44 Závislost mezi napětím a poměrnou deformací AS 5%

12.5 AS Woplé Quartz 10%

Tab. 12.5 Vyhodnocení vzorku AS 10%

AS 10%	E	σ_m	F	ϵ	W to Fm	a	b	S
n=10	MPa	MPa	MPa	%	Nmm	mm	mm	mm ²
1	9520	356	358	4	921,5	1,65	18,9	31,19
2	13600	352	353	2,8	623,69	1,65	18,9	31,19
3	11600	154	277	4,2	868,55	1,65	18,9	31,19
4	11400	334	339	3,2	704,43	1,65	18,3	30,2
5	15200	321	388	3,4	858,36	1,65	18,3	30,2
6	10800	279	327	5,1	1244,33	1,65	18,3	30,2
7	11200	380	392	4,7	1318,01	1,65	18,1	29,87
8	8940	242	270	4,2	809,47	1,65	18,2	30,03
9	14000	313	382	3,5	863,4	1,65	18,3	30,2
10	15400	136	228	3,7	615,79	1,65	18,3	30,2
x	12200	287	331	3,9	882,75	1,65	18,45	30,44
s	2270	84,6	55,9	0,7	235,33	0	0,3171	0,52
v	18,66	29,5	16,89	17,9	26,66	0	1,72	1,72

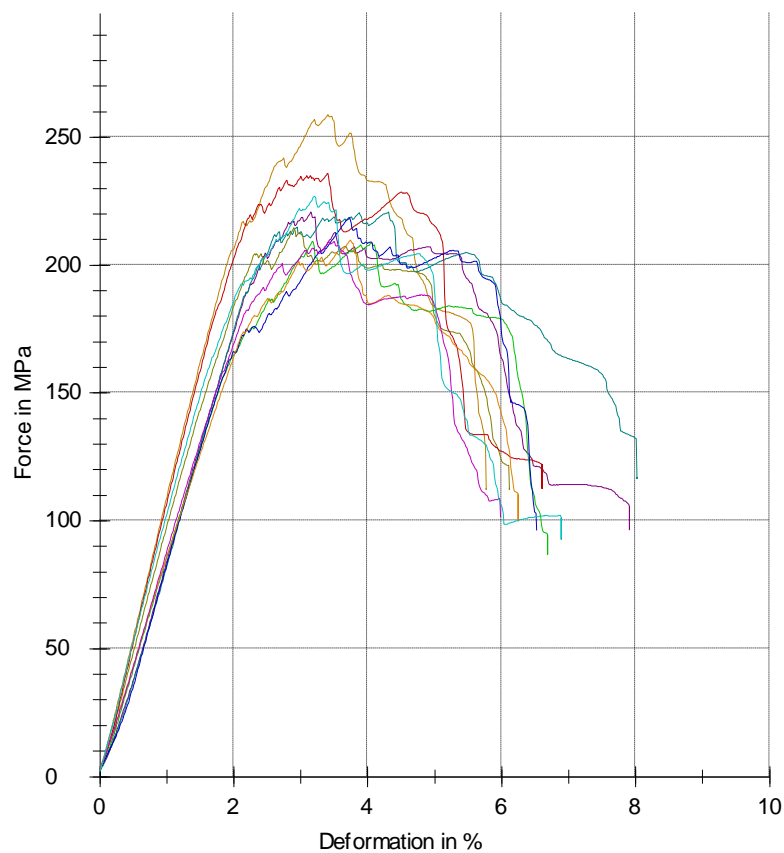


Obr. 45 Závislost mezi napětím a poměrnou deformací AS 10%

12.6 Grafit 5%

Tab. 12.6 Vyhodnocení vzorku GR 5%

GR 5%	E	σ_m	F	ϵ	W to Fm	a	b	S
n=10	MPa	MPa	MPa	%	Nmm	mm	mm	mm ²
1	10100	230	259	3,4	662,38	1,81	18,8	34,03
2	6610	206	221	3,2	488,77	1,81	18,8	34,03
3	5930	220	221	4,3	782,24	1,81	18,6	33,67
4	8900	201	215	2,9	462,07	1,81	19,3	34,93
5	9070	230	236	3,4	635,86	1,81	18,7	33,85
6	7610	190	209	3,2	492,55	1,81	19,5	35,3
7	5550	209	219	3,7	545,8	1,81	17,1	30,95
8	7680	187	210	3,7	568,07	1,81	17,5	31,68
9	7670	197	209	3,4	554,63	1,81	19,1	34,57
10	9720	194	227	3,2	567,85	1,81	19,6	35,48
x	7880	206	223	3,4	576,02	1,81	18,7	33,85
s	1560	15,8	15,3	0,4	95,82	0	0,8165	1,48
v	19,72	7,64	6,9	11,57	16,63	0	4,37	4,37

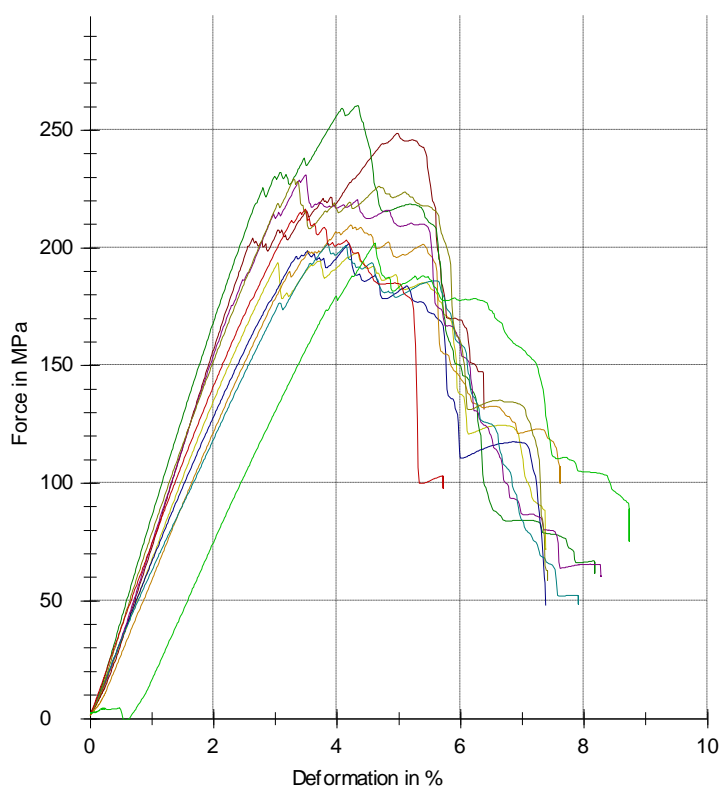


Obr. 46 Závislost mezi napětím a poměrnou deformací GR 5%

12.7 Grafit 10%

Tab. 12.7 Vyhodnocení vzorku GR 10%

GR 10%	E	σ_m	F	ϵ	W to Fm	a	b	S
n=10	MPa	MPa	MPa	%	Nmm	mm	mm	mm ²
1	5840	185	198	4,3	884,26	2,3	19,6	45,08
2	5070	246	249	5	1158,35	2,3	18,2	41,86
3	7390	231	260	4,3	1043,01	2,3	18,2	41,86
4	5900	198	202	4,2	715,22	2,3	16,9	38,87
5	4030	197	210	4,2	787,92	2,3	18,9	43,47
6	5810	218	231	3,5	664,64	2,3	18,3	42,09
7	6140	175	202	3,9	616,66	2,3	17,5	40,25
8	6690	218	229	3,3	593,07	2,3	17,9	41,17
9	7270	179	217	3,5	641,08	2,3	18,7	43,01
10	1080	4,08	202	4,6	664	2,3	19	43,7
x	5520	185	220	4,1	776,82	2,3	18,32	42,14
s	1850	67,6	21,7	0,5	192,94	0	0,78	1,79
v	33,5	36,54	9,85	13,19	24,84	0	4,26	4,26

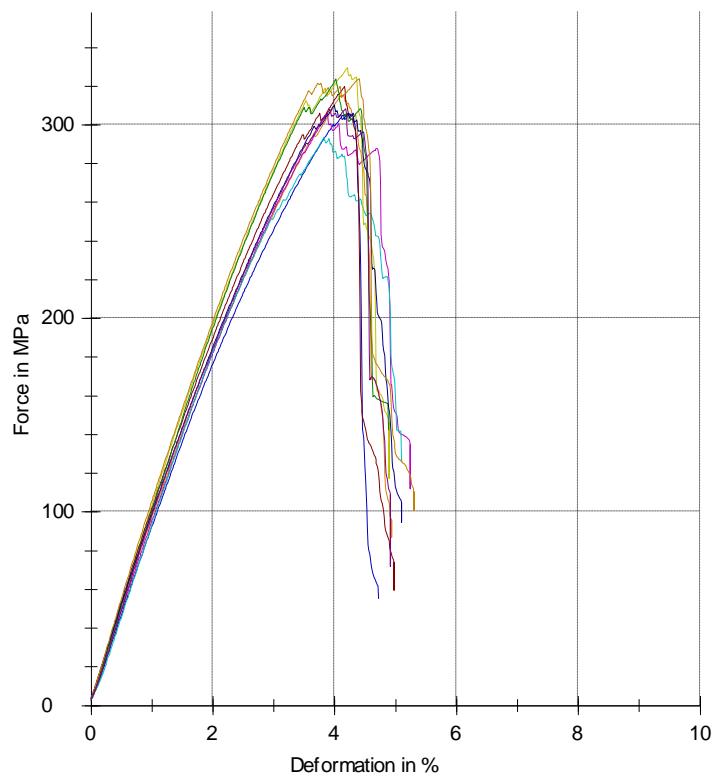


Obr. 47 Závislost mezi napětím a poměrnou deformací GR 10%

12.8 Grafit_1 5%

Tab. 12.8 Vyhodnocení vzorku GR_1 5%

GR_1 5%	E	σ_m	F	ϵ	W to Fm	a	b	S
n=10	MPa	MPa	MPa	%	Nmm	mm	mm	mm ²
1	8820	240	306	4,3	828,8	1,6	19,1	30,56
2	9270	235	315	4,1	813,62	1,6	19,3	30,88
3	9020	255	306	3,9	672,23	1,6	18	28,8
4	7650	289	293	3,8	653,62	1,6	18,2	29,12
5	9510	300	330	4,2	855,53	1,6	18,5	29,6
6	10000	216	320	4,2	798,51	1,6	18,2	29,12
7	9720	281	324	4	776,54	1,6	18,3	29,28
8	9770	210	310	4	732,18	1,6	18,3	29,28
9	10300	248	324	4,4	886,82	1,6	17,7	28,32
10	8910	274	308	4,2	760,31	1,6	17,7	28,32
x	9300	255	314	4,1	777,82	1,6	18,33	29,33
s	750	30,7	10,9	0,2	75,42	0	0,5272	0,84
v	8,07	12,07	3,46	4,38	9,7	0	2,88	2,88

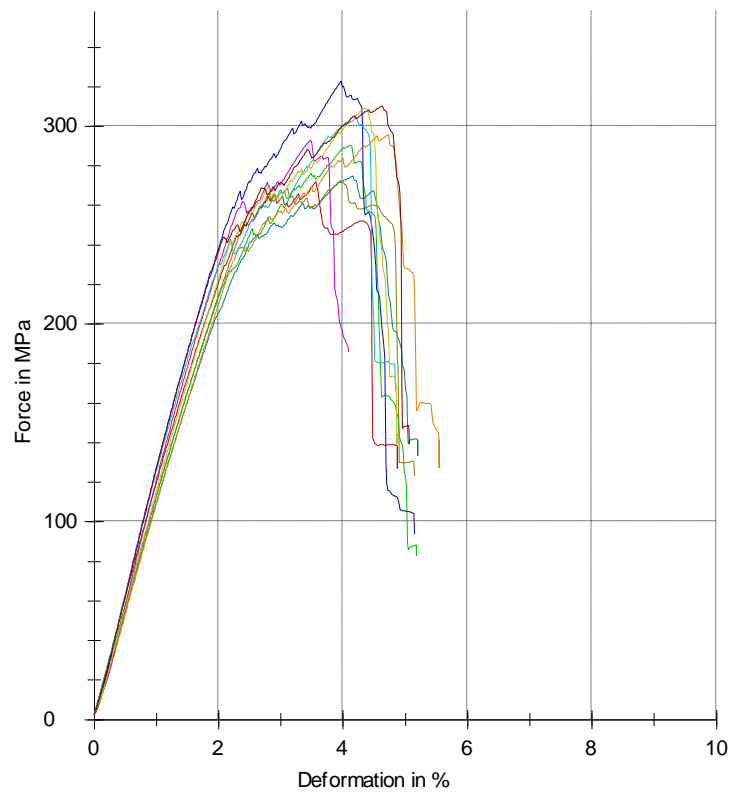


Obr. 48 Závislost mezi napětím a poměrnou deformací GR_1 5%

12.9 Grafit_1 10%

Tab. 12.9 Vyhodnocení vzorku GR_1 10%

GR_1 10%	E	σ_m	F	ϵ	W to Fm	a	b	S
n=10	MPa	MPa	MPa	%	Nmm	mm	mm	mm ²
1	10200	245	275	4,2	1021,11	1,85	20,6	38,11
2	9010	266	273	4	965,83	1,85	20,3	37,56
3	11700	242	272	3,6	752,46	1,85	18,1	33,49
4	10700	240	290	4,1	929,15	1,85	18,3	33,86
5	12200	263	323	4	977,92	1,85	18,3	33,86
6	8940	259	296	4,7	1159,62	1,85	18,9	34,97
7	9050	289	293	3,5	782,45	1,85	18,9	34,97
8	11800	239	304	4,2	1002,61	1,85	18,1	33,49
9	10100	266	309	4,3	976,96	1,85	17,2	31,82
10	11600	248	310	4,6	1112,23	1,85	17,2	31,82
x	10100	321	336	3,4	900,31	2,1	18,56	38,98
s	1910	31,8	34,6	0,3	99,24	0	0,4993	1,05
v	18,85	9,91	10,31	7,81	11,02	0	2,69	2,69

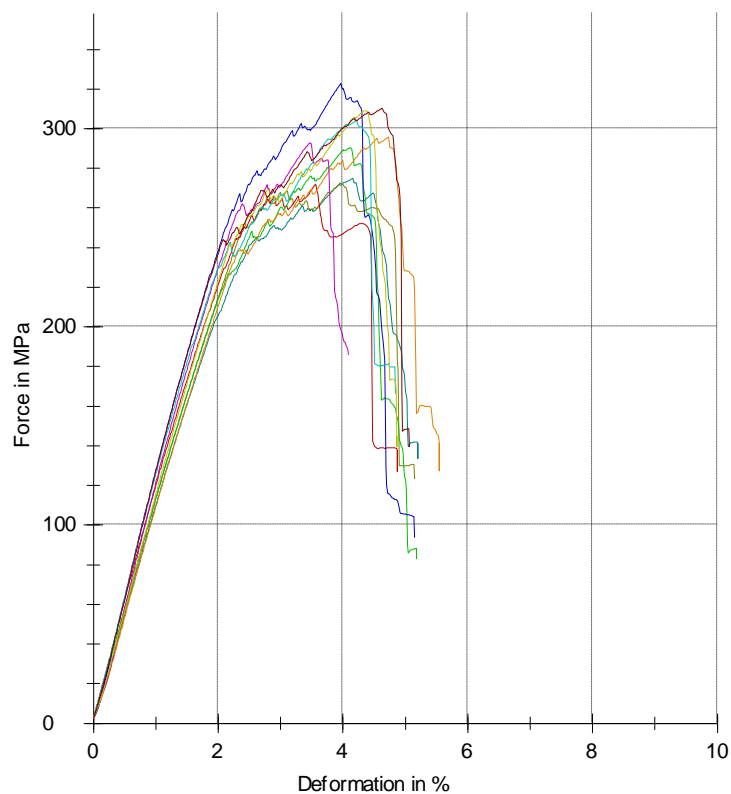


Obr. 49 Závislost mezi napětím a poměrnou deformací GR_1 10%

12.10 Grafit_1 15%

Tab. 12.10 Vyhodnocení vzorku GR_1 15%

GR_1 15%	E	σ_m	F	ϵ	W to Fm	a	b	S
n=10	MPa	MPa	MPa	%	Nmm	mm	mm	mm ²
1	6970	263	274	3,9	884,44	2,1	19,4	40,74
2	9950	339	351	3,5	1001,51	2,1	19,4	40,74
3	9660	293	301	3,7	891,81	2,1	18,1	38,01
4	10700	347	381	3,1	909,48	2,1	18,6	39,06
5	9990	301	307	3,1	718,36	2,1	18,5	38,85
6	12200	355	360	3	795,54	2,1	18,1	38,01
7	12400	354	376	3,5	1011,04	2,1	18,1	38,01
8	7630	302	327	3,6	909,39	2,1	18,3	38,43
9	9370	311	326	3,4	845,16	2,1	18,3	38,43
10	12500	349	355	3,4	1036,38	2,1	18,8	39,48
x	10500	256	295	4,1	968,04	1,85	18,59	34,39
s	1250	16	17,5	0,4	126,54	0	1,139	2,11
v	11,91	6,26	5,93	9,78	13,07	0	6,13	6,13

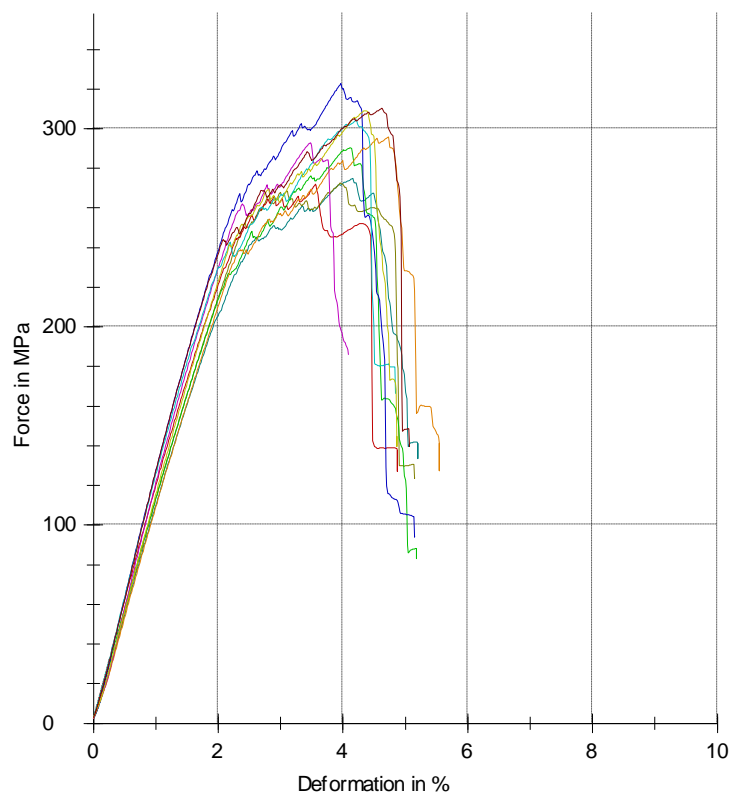


Obr. 50 Závislost mezi napětím a poměrnou deformací GR_1 15%

12.11 Grafit_1 20%

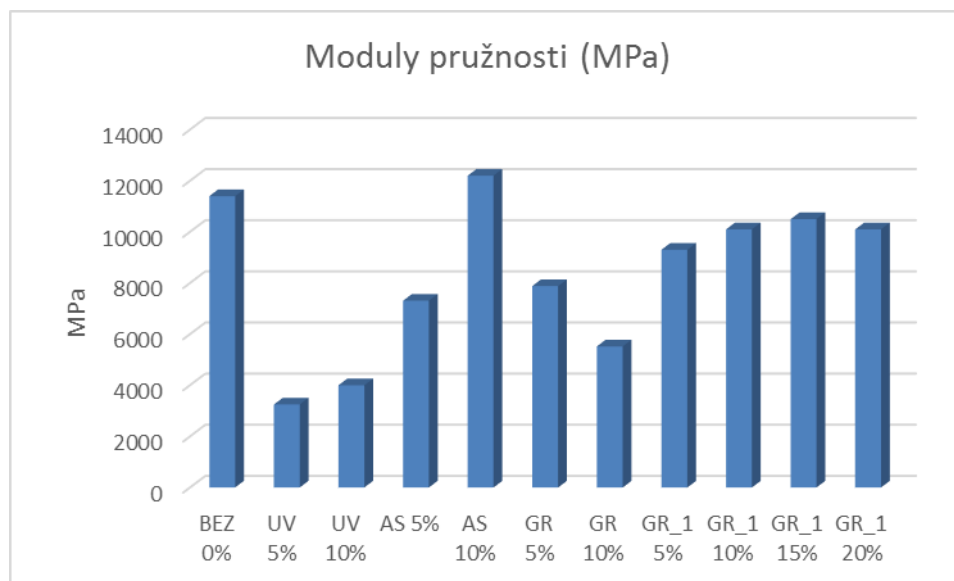
Tab. 12.11 Vyhodnocení vzorku GR_1 20%

GR_1 20%	E	σ_m	F	ϵ	W to Fm	a	b	S
n=10	MPa	MPa	MPa	%	Nmm	mm	mm	mm ²
1	8260	272	274	3,8	855,16	2,1	18,2	38,22
2	6330	225	244	4,5	865,38	2,1	17,5	36,75
3	8980	233	246	3,9	817,78	2,1	18,2	38,22
4	8170	266	275	3,3	706,43	2,1	18,4	38,64
5	10600	269	324	4	1044,37	2,1	18	37,8
6	10200	252	294	4,1	1060,61	2,1	18	37,8
7	10600	319	355	4,5	1479,74	2,1	19	39,9
8	11900	286	336	3,7	1042,87	2,1	19	39,9
9	13800	294	384	3,5	1068,96	2,1	18,3	38,43
10	11800	359	367	3,9	1203,13	2,1	18,3	38,43
x	10100	278	310	3,9	1014,44	2,1	18,29	38,41
s	2190	40,1	50,3	0,4	221,12	0	0,4508	0,95
v	21,76	14,44	16,22	9,64	21,8	0	2,46	2,46

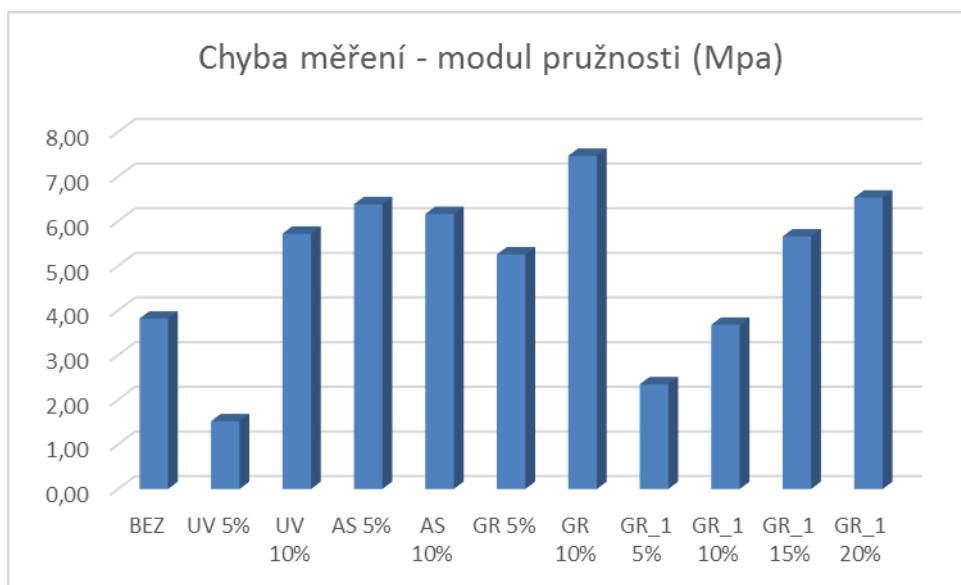


Obr. 51 Závislost mezi napětím a poměrnou deformací GR_1 20%

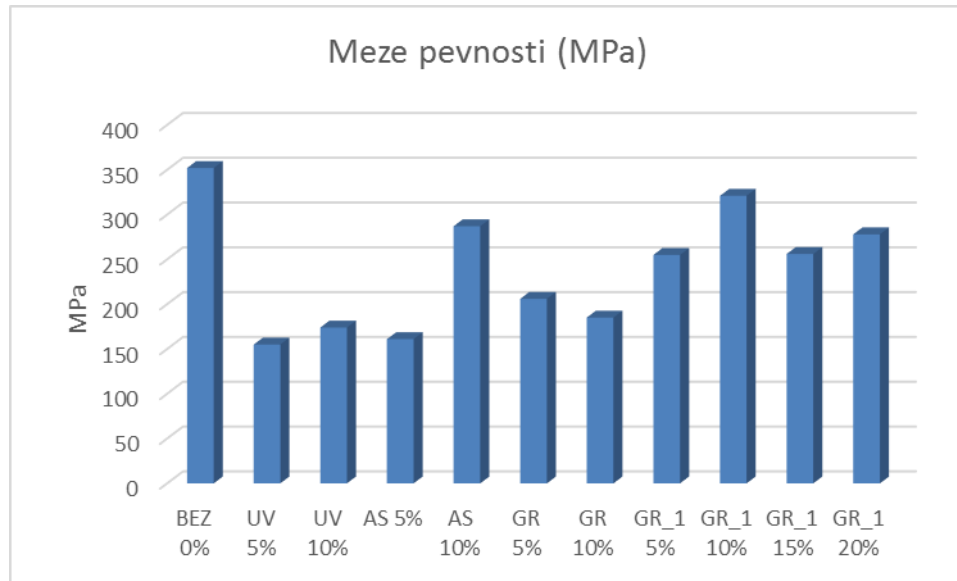
12.12 Závěrečné vyhodnocení



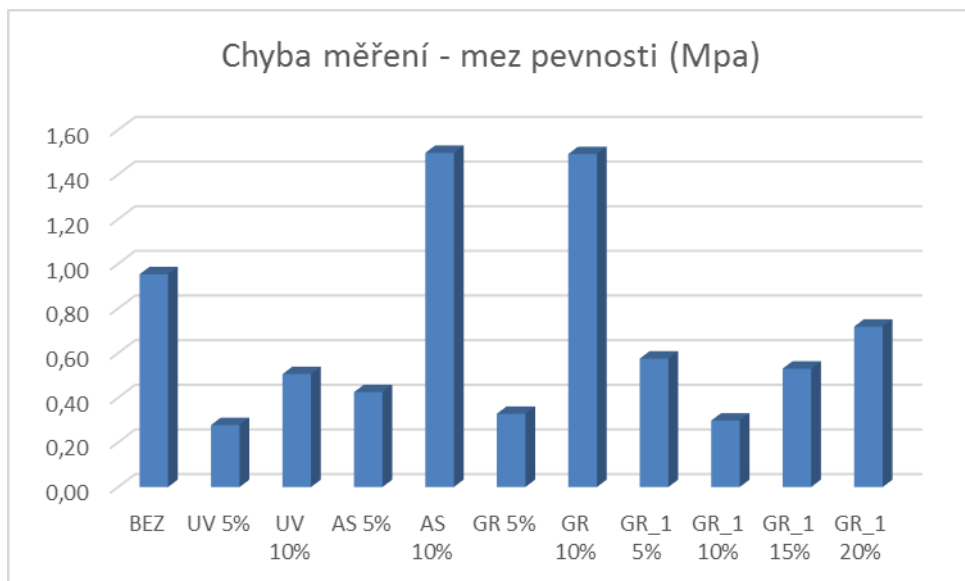
Obr. 52 Moduly pružnosti – všech vzorků



Obr. 53 Chyba měření – modul pružnosti



Obr. 54 Meze pevnosti – všech vzorků



Obr. 55 Chyba měření – mez pevnosti

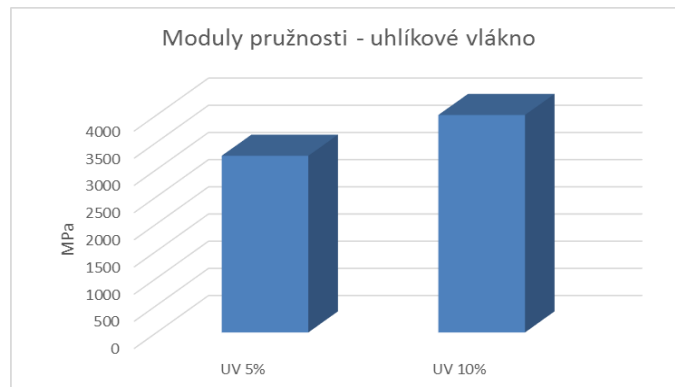
Při závěrečném vyhodnocování je třeba se zaměřit na dvě veličiny, které jsou pro nás nejdůležitější. Těmi jsou modul pružnosti E (MPa) a mez pevnosti σ_m (MPa).

Nejvyšší modul pružnosti má vzorek bez plniva, načež nejnižší má vzorek UV 5%. Ve většině lze vidět, že s přibývajícím množstvím plniva se zvětšuje i modul pružnosti. U vzorku GR modul pružnosti klesá s přibývajícím plnivem.

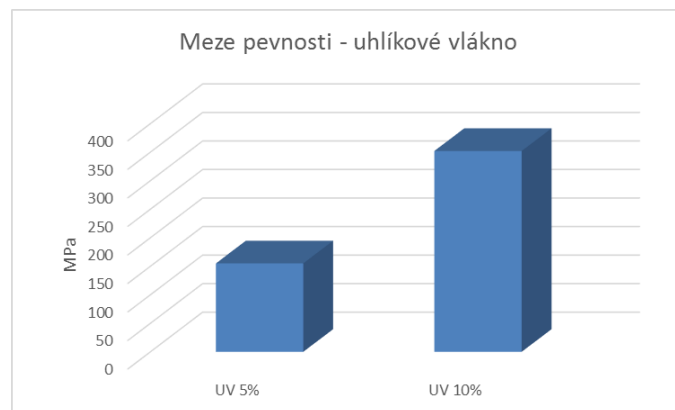
Nejvyšší mez pevnosti má vzorek bez plniva, načež nejnižší má vzorek UV 5%. U vzorků UV a AS jde vidět, že s přibývajícím množstvím plniva se mez pevnosti zvedá, naopak u vzorků GR a GR_1 se s počtem plniva snižuje, nebo zůstává podobná.

Výsledné hodnoty měření mohou být ovlivněny nepřesnou distribucí plniva v testovaných vzorcích.

12.12.1 Uhlíkové vlákno

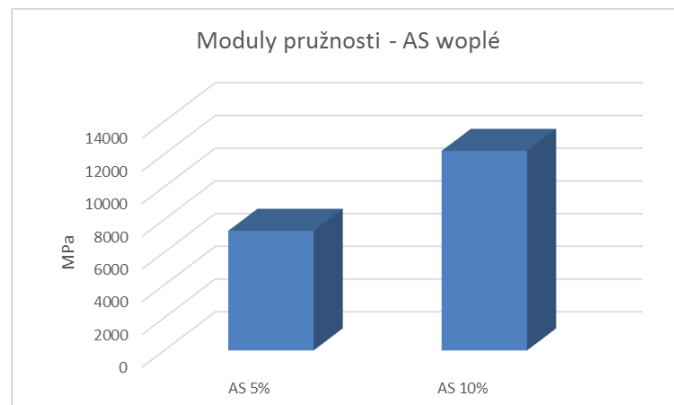


Obr. 56 Moduly pružnosti – UV

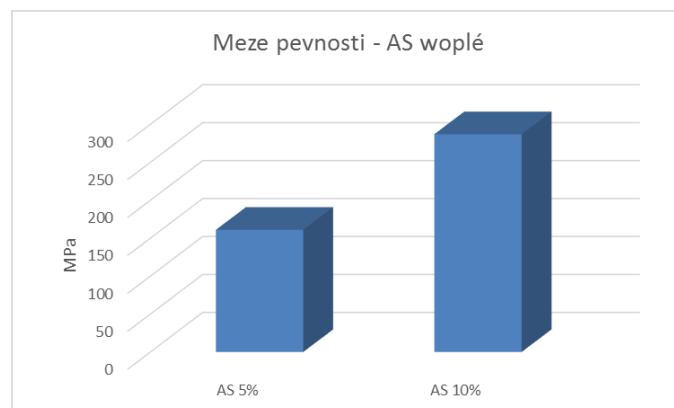


Obr. 57 Meze pevnosti – UV

12.12.2 AS Woplé Quartz

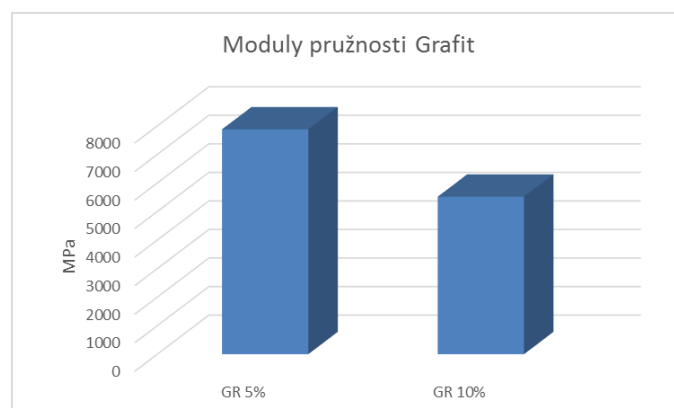


Obr. 58 Moduly pružnosti – AS

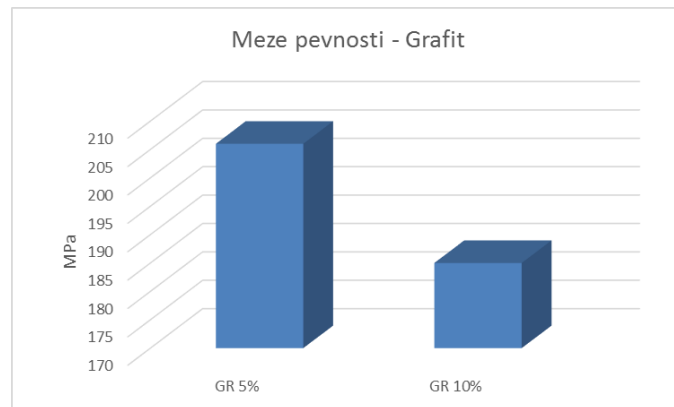


Obr. 59 Meze pevnosti – AS

12.12.3 Grafit

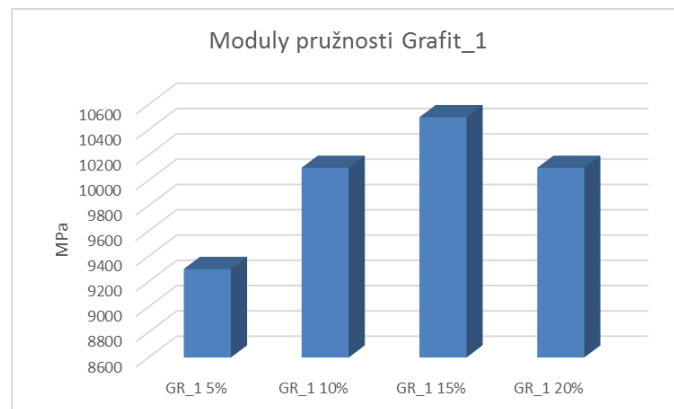


Obr. 60 Moduly pružnosti – GR

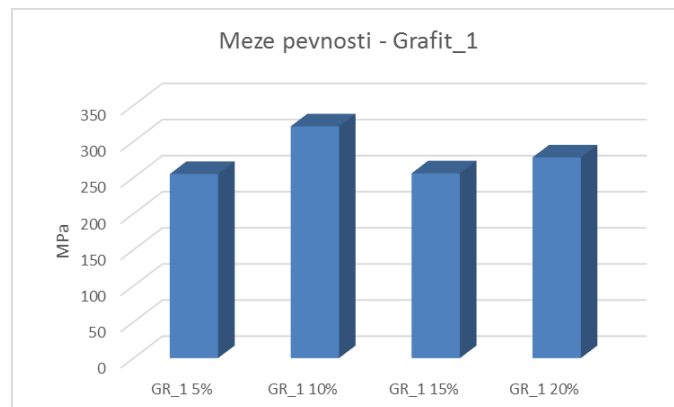


Obr. 61 Meze pevnosti – GR

12.12.4 Grafit_1



Obr. 62 Moduly pružnosti – GR_1



Obr. 63 Meze pevnosti – GR_1

13 ZÁVĚR

Hlavní náplní mé práce bylo vyhodnocení elektrických a mechanických vlastností na kompozitních materiálech, které byly plněny přísadami o různých % objemu.

V první části mé diplomové práce jsem se zaměřil na výrobu kompozitních desek, z kterých se následně dělaly vzorky pro zkoušení požadovaných vlastností. Byla zvolena skelná tkanina, na kterou se nanášela pryskyřice s danými plnivými. Jako výchozí se vytvořila kompozitní deska bez plniv. Poté jsme už do výroby zapojily plniva (grafit, uhlíkové vlákna aj.). Byly vyrobeny tři druhy desek s 5 a 10% plniva a jeden druh desek s 5,10,15 a 20% plniva. Z vyrobených desek byly vyrobeny malé vzorky pro zkoušky elektrické vodivosti a zkoušky mechanické (zkouška ohybem a zkouška rázem).

Jako hlavní částí diplomové práce byla zkouška elektrické vodivosti. Při měření elektrických vlastností vzorků probíhalo měření od 30°C do 150°C při stejnosměrném napětí 1 V. Při určování velikosti vodivosti v závislosti na teplotě bylo zjištěno, že vodivost se u kompozitních materiálů objevuje až od určité teploty. Převážně se vodivost začala objevovat okolo 100°C.

Pokud vezmeme v potaz, jednotlivé přísady a množství přísad tak vidíme, že nejnižší vodivost má materiál bez přísad 0%. U uhlíkových vláken (UV) a grafitu (GR) bylo zjištěno, že s přibývajícím % plniva stoupá vodivost. U vzorku AS Woplé to bylo naopak, kdy s 10% plniva byla vodivost nižší, jak s 5% plniva. U vzorků GR_1 vyšla největší vodivost u vzorku GR_1 15% a nejnižší u vzorku GR_1 20%. Tato nepřesnost mohla být způsobena špatnou distribucí plniva při výrobě vzorků.

U velikosti proudu v závislosti na teplotě nám s nejvyššími hodnotami vyšel vzorek UV 10%, přičemž nejmenší proud je u vzorku bez přísad (BEZ).

V dalším měření proběhla mechanická zkouška a to zkouška rázem. Z výsledných hodnot lze usoudit, že s přibývajícím množstvím plniva se zvyšuje houževnatost kompozitního materiálu. Toto tvrzení však neplatí u vzorku GR_1, kde hodnoty velikosti houževnatosti vyšly rozdílné v závislosti na přibývajícím množství plniva.

Jako poslední se vyhodnocovala mechanická zkouška, zkouška ohybem. U této zkoušky se vyhodnocovali dvě veličiny a to modul pružnosti E (MPa) a mez pevnosti σ_m (MPa). U modulu pružnosti byly hodnoty různorodé. U dvou vzorků modul pružnosti

s přibývajícím množstvím plniva stoupá, naopak grafitu klesá. U meze pevnosti nám výsledky vyšly podobně jak u modulu pružnosti. U dvou vzorků mez pevnosti stoupá v závislosti s množstvím plniva, načež u další dvou vzorků s přibývajícím plnivem klesá, nebo je střídavý.

Závěrem lze říci, že množství plniva nemá vliv na mechanické vlastnosti, nanejvýše se přidáváním plniva zhoršuje zpracovatelnost a poté i mechanické vlastnosti. U měření elektrické vodivosti nemá plnivo vliv do teploty okolo 100°C. Po překročení teploty 100°C se elektrická vodivost s množstvím plniva liší.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KOLAŘÍK J.,: *Vysokomodulová polymerní vlákna a vláknové kompozity*. Academia, Praha 1984.
- [2] R. A. BAREŠ: *Kompozitní materiály*, Praha SNTL, 1988.
- [3] STOKLASA K., *Makromolekulární chemie II*, interní text na Ft UTB ve Zlíně
- [4] KRATOCHVÍL, B.; Švorčík, V.; Vojtěch, D.. *Úvod do studia materiálů*. Praha: VSCHT, 2005. 190 s. ISBN 80-7080-568-4
- [5] LAŠ, V.: *Mechanika kompozitních materiálů*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2004. ISBN 80-7043-273 – X.
- [6] MEISNER, Bohumil a Václav ZILVAR. *Fyzika polymerů. Struktura a vlastnosti polymerních materiálů*. 1. vydání. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987.
- [7] STEJSKAL, Jaroslav, et al. POLYANILIN A POLYPYRROL – DVA PŘEDSTAVITELÉ VODIVÝCH POLYMERŮ. *Chem. Listy*. 2001, 95, s. 484-492.
- [8] MIŠUČÍK, M., *Polymérne mikro- a nano-kompozity s modifikovanými plnivami*, Ústav polymérov, Slovenská akadémia vied, Bratislava (2007)
- [9] VILČÍKOVÁ, J., habilitation thesis, *Electrical and magnetic properties of polymer composites*, UTB ve Zlíně (2007), ISBN 978-80-7318-519-0
- [10] STOKLASA K., *Vlastnost polymerních materiálů*, interní text na FT UTB ve Zlíně
- [11] MEISSNER B., V. Zilvar, *Fyzika polymerů*, SNTL (1987), 255, ISBN 04-634-87
- [12] PULCOVÁ, Tereza. *Elektrické vlastnosti pryže*. Zlín, 2011. Seminární práce, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická.
- [13] LIBRA, Miroslav. *Sledování vlastností nanokompozitů na bázi epoxidových pryskyřic*. Brno, 2011. Dostupné z: <http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_ver_ejne.php?file_id=42309>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Ing. Helena Polsterová, Csc.
- [14] HADAČ, J., diplomová práce na Ústavu polymerů, FT UTB ve Zlíně, (2001)

- [15] NIELSEN L.E.: *Mechanical properties of Polymers and Composites*. Marcel Dekker, New York 1974.
- [16] K.K. CHAWLA: *Composite Materials Science and Engineering*, 2nd Edition, Springer, New York, 1998.
- [17] SALANECK, W. R. a J. L. BRÉDAS. CONJUGATED POLYMERS. *Solid State Communications, Voi. 92: Elsevier Science Ltd.* 1994. 0038-1098(94)00486-2.
- [18] RHODES, Susan M. *ELECTRICALLY CONDUCTIVE POLYMER COMPOSITES*. 2007. Dissertation. The Graduate Faculty of the University of Akron. Vedoucí práce Dr. Roderic Quirk.
- [19] TIITU, MARI. INVESTIGATIONS OF FUNCTIONAL ELECTROACTIVE POLYMERS. Espoo, 2006. 48 s. Dizertační práce. Helsinki University of Technology.
- [20] MOLITON, André. HANDBOOK OF CONDUCTING POLYMERS. New York: Marcel Dekker, 1998. Ion Implantation Doping of Electroactive Polymers and Device Fabrication, s. 589-639
- [21] SHIRAKAWA, Hideki. *HANDBOOK OF CONDUCTING POLYMERS*. New York : Marcel Dekker, 1998. Synthesis of Polyacetylene, s. 197-209.
- [22] PULICKLEL M. AJAYAN, Linda S. Schadler, Paul V. Braun, *Nanocomposite Science and Technology*, Wiley-VCH (2003), 52, ISBN 3-527-30359-6
- [23] M. AROUS, B. ARNOR, A. KALLEL, Z. FAKHFAKH, G. PERRIER, *Crystallinity and dielectric relaxations in semi-crystalline poly(ether ether ketone)*, JOURNAL OF PHYSICS AND CHEMISTRY OF SOLIDS 68, (2007), 1405-1414
- [24] *Všeobecný popis materiálů používaných při výrobě kompozitů* [online]. 2007 [cit. 2012-01-20]. Dostupné z: <<http://www.modding.cz/?p=73>>
- [25] *Textilní vlákno*, Wikipedie [online], dostupné z www: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Textiln%C3%AD_vl%C3%A1kno>
- [26] *Všeobecný a základní popis materiálů používaných při výrobě kompozitů*. [online]. 14.12.2005 [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: 1. <http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/74-Vseobecny-a-zakladni-popis-materialu-pouzivanych-pri-vyrobe-kompozitu.html>

[27] SCHOCH, K.F. Electrically Conductive Polymers and Their Applications. Electrical insulation magazine. 1986, vol. 2, s. 20-25

[28] PRATT, Colin. CONDUCTING POLYMERS. 1996. Dostupné z:

<http://homepage.ntlworld.com/colin.pratt/cpoly.pdf>

[29] *Technologie výroby kompozitů*, Havel composites [online], dostupné z www:

<http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/76-Technologie-jejich-popis-a-schemata.html>

[30] Wikipedia *Dielektrikum* [on-line].[cit. 2007-11-08]

<http://cs.wikipedia.org/wiki/Dielektrikum>

[31] Interní zdroje

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

°C	Stupeň Celsia
A	ampér
A.s	ampérsekunda
A.V-1	ampér/volt
C	Coulomb
C	Náboj
E	Intenzita elektrického pole
E	Modul pružnosti
Ea	Aktivační energie vodivosti
Ep	Elektrická pevnost
G	Vodivost
σ	Vodivost
I	Elektrický proud
J	Joul
J	Proudová hustota
L	Délka
M	Modul
N	Newton
N.C-1	Newton na Coulomb
Nm	Newtonmetr
Qo	Velikost náboje
R	Odpor
S	Siemens
S.m-1	Siemens na metr

S	Plocha průřezu
U	Elektrické napětí
V	Volt
V.m-1	Volt/metr
V _o	Perkolační práh
T	Teplota
T _g	Teplota skelného přechodu
T _o	Teplota v bodě zlomu
a	Tloušťka
b	Šířka
mm	Milimetr
q	Náboj
s	Sekunda
tg δ	Ztrátový činitel
δ	Ztrátový úhel
μm	Mikrometr
σ	Měrná elektrická vodivost
σ ₀	Měrná elektrická vodivost látky
σ _m	Mez pevnosti
Ω	Ohm
Ω.cm-1	Ohm na centimetr

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Rozdělení kompozitů [25]</i>	14
<i>Obr. 2 Typy plniva dle geometrických tvarů [4]</i>	16
<i>Obr. 3 Dělení výztuže vláken [5]</i>	17
<i>Obr. 4 Základní typy tkaní [26]</i>	18
<i>Obr. 5 Schéma výroby kompozitu stříkáním [29]</i>	19
<i>Obr. 6 Postup výroby pomocí RTM [29]</i>	20
<i>Obr. 7 Součásti forem pro vakuovou infuzi [29]</i>	21
<i>Obr. 8 Uzavřená pultruační linka (1-výztuž, 2-tlaková pultruze,3-odtah,4-dělicí zařízení) [29]</i>	22
<i>Obr. 9 Schéma výroby kompozitů ručním kladením [29]</i>	23
<i>Obr. 10 Závislost el. vodivosti některých polymerů na teplotě (arrheniovske souřadnice) [6]</i>	26
<i>Obr. 11 Odporový dělič a zapojení do můstku [12]</i>	28
<i>Obr. 12 Překrývání Pz orbitalů vede k XX-konjugaci a k vodivosti [18]</i>	38
<i>Obr. 13 Zástupci vodivých konjugovaných polymerů [7]</i>	41
<i>Obr. 14 Závislost měrné elektrické vodivosti na koncentraci plniva [22]</i>	42
<i>Obr. 15 Nepochární dielektrikum</i>	46
<i>Obr. 16 Polární dielektrikum</i>	46
<i>Obr. 17 Skelná tkanina</i>	50
<i>Obr. 18 Separátor se skleněnou deskou</i>	53
<i>Obr. 19 Vrstvy tkaniny bez přísad</i>	55
<i>Obr. 20 Schéma zařízení Novocontrol Concept 90</i>	56
<i>Obr. 21 Měřicí přístroj Novocontrol concept 90</i>	57
<i>Obr. 22 Měřicí buňka</i>	57
<i>Obr. 23 Charpyho kladivo (stroj Resil Inpactor Junior)</i>	58
<i>Obr. 24 Přístroj Zwick 145 665</i>	59
<i>Obr. 25 Závislost vodivosti na teplotě - BEZ</i>	61
<i>Obr. 26 Závislost proudu na teplotě - BEZ</i>	61
<i>Obr. 27 Závislost vodivosti na teplotě - UV</i>	63
<i>Obr. 28 Závislost proudu na teplotě - UV</i>	63
<i>Obr. 29 Závislost vodivosti na teplotě – AS</i>	65

<i>Obr. 30</i> Závislost proudu na teplotě – AS.....	65
<i>Obr. 31</i> Závislost vodivosti na teplotě - GR.....	67
<i>Obr. 32</i> Závislost proudu na teplotě - GR	67
<i>Obr. 33</i> Závislost vodivosti na teplotě - GR_1.....	70
<i>Obr. 34</i> Závislost proudu na teplotě – GR_1	70
<i>Obr. 35</i> Závislost vodivosti na teplotě - celková.....	71
<i>Obr. 36</i> Závislost proudu na teplotě - celková.....	71
<i>Obr. 37</i> Rázová houževnatost – Am	78
<i>Obr. 38</i> Chyba měření – rázová houževnatost Am	78
<i>Obr. 39</i> Celková rázová houževnatost – Ab.....	79
<i>Obr. 40</i> Chyba měření – celková rázová houževnatost Ab	79
<i>Obr. 41</i> Závislost mezi napětím a poměrnou deformací BEZ.....	81
<i>Obr. 42</i> Závislost mezi napětím a poměrnou deformací UV 5%	82
<i>Obr. 43</i> Závislost mezi napětím a poměrnou deformací UV 10%	83
<i>Obr. 44</i> Závislost mezi napětím a poměrnou deformací AS 5%	84
<i>Obr. 45</i> Závislost mezi napětím a poměrnou deformací AS 10%.....	85
<i>Obr. 46</i> Závislost mezi napětím a poměrnou deformací GR 5%	86
<i>Obr. 47</i> Závislost mezi napětím a poměrnou deformací GR 10%	87
<i>Obr. 48</i> Závislost mezi napětím a poměrnou deformací GR_1 5%	88
<i>Obr. 49</i> Závislost mezi napětím a poměrnou deformací GR_1 10%	89
<i>Obr. 50</i> Závislost mezi napětím a poměrnou deformací GR_1 15%	90
<i>Obr. 51</i> Závislost mezi napětím a poměrnou deformací GR_1 20%	91
<i>Obr. 52</i> Moduly pružnosti – všech vzorků	92
<i>Obr. 53</i> Chyba měření – modul pružnosti.....	92
<i>Obr. 54</i> Meze pevnosti – všech vzorků.....	93
<i>Obr. 55</i> Chyba měření – mez pevnosti.....	93
<i>Obr. 56</i> Moduly pružnosti – UV.....	94
<i>Obr. 57</i> Meze pevnosti – UV	94
<i>Obr. 58</i> Moduly pružnosti – AS	95
<i>Obr. 59</i> Meze pevnosti – AS.....	95
<i>Obr. 60</i> Moduly pružnosti – GR.....	95
<i>Obr. 61</i> Meze pevnosti – GR.....	96
<i>Obr. 62</i> Moduly pružnosti – GR_1.....	96

Obr. 63 Meze pevnosti – GR_1 96

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 3.1 Klasifikace elektricky vodivých látek [6]</i>	25
<i>Tab. 3.2 Podrobnější klasifikace elektricky vodivých látek [6]</i>	26
<i>Tab. 3 Laminační pryskyřice L285</i>	50
<i>Tab. 4 Mechanická data nezesílené pryskyřice</i>	51
<i>Tab. 6.3 Tabulka pro výpočet hmotností přísad GR_1</i>	54
<i>Tab. 6 Vyhodnocení vzorku BEZ</i>	60
<i>Tab. 7 Vyhodnocení vzorku UV 5%</i>	62
<i>Tab. 8 Vyhodnocení vzorku UV 10%</i>	62
<i>Tab. 9 Vyhodnocení vzorku AS 5%</i>	64
<i>Tab. 10 Vyhodnocení vzorku AS 10%</i>	64
<i>Tab. 11 Vyhodnocení vzorku GR 5%</i>	66
<i>Tab. 12 Vyhodnocení vzorku GR 10%</i>	66
<i>Tab. 13 Vyhodnocení vzorku GR_1 5%</i>	68
<i>Tab. 14 Vyhodnocení vzorku GR_1 10%</i>	68
<i>Tab. 15 Vyhodnocení vzorku GR_1 15%</i>	69
<i>Tab. 16 Vyhodnocení vzorku GR_1 20%</i>	69
<i>Tab. 17 Vyhodnocení vzorku BEZ</i>	74
<i>Tab. 18 Vyhodnocení vzorku UV 5%</i>	74
<i>Tab. 19 Vyhodnocení vzorku UV 10%</i>	74
<i>Tab. 20 Vyhodnocení vzorku AS 5%</i>	75
<i>Tab. 21 Vyhodnocení vzorku AS 10%</i>	75
<i>Tab. 22 Vyhodnocení vzorku GR 5%</i>	75
<i>Tab. 23 Vyhodnocení vzorku GR 10%</i>	76
<i>Tab. 24 Vyhodnocení vzorku GR_1 5%</i>	76
<i>Tab. 25 Vyhodnocení vzorku GR_1 10%</i>	76
<i>Tab. 26 Vyhodnocení vzorku GR_1 15%</i>	77
<i>Tab. 27 Vyhodnocení vzorku GR_1 20%</i>	77
<i>Tab. 12.1 Vyhodnocení vzorku BEZ</i>	81
<i>Tab. 12.2 Vyhodnocení vzorku UV 5%</i>	82
<i>Tab. 12.3 Vyhodnocení vzorku UV 10%</i>	83
<i>Tab. 12.4 Vyhodnocení vzorku AS 5%</i>	84

<i>Tab. 12.5 Vyhodnocení vzorku AS 10%</i>	85
<i>Tab. 12.6 Vyhodnocení vzorku GR 5%</i>	86
<i>Tab. 12.7 Vyhodnocení vzorku GR 10%</i>	87
<i>Tab. 12.8 Vyhodnocení vzorku GR_1 5%</i>	88
<i>Tab. 12.9 Vyhodnocení vzorku GR_1 10%</i>	89
<i>Tab. 12.10 Vyhodnocení vzorku GR_1 15%</i>	90
<i>Tab. 12.11 Vyhodnocení vzorku GR_1 20%</i>	91

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Technický list epoxidové pryskyřice L 285

Příloha 2: Technický informační list norpol 420-100

PŘÍLOHA 1: TECHNICKÝ LIST EPOXIDOVÉ PRYSKYŘICE L 285



Laminating resin L 285
Hardener 500

Résine L 285
Durcisseur 500

Characteristics

Caractéristiques

Approval:	--
Application:	Production of composite structures Boat and shipbuilding Sports equipment Model airplanes Moulds and tools
Operational temperature:	-60°C → +50 - 60°C (-75°F → +120 - 140°F) without heat treatment
Processing:	At temperatures between 10°C and 40°C (50-105°F) All usual processing methods
Special properties:	Extremely good physiological compatibility Good mechanical properties Very short curing times even at low temperatures
Special modifications:	L 285 T: Thixotropic L 285 W: White

Homologation:	--
Domaines d'application:	Fixations et encollages lors de la fabrication de composants en matériaux composites Construction de bateaux, équipements sportifs, aéromodélisme Construction de moules, de gabarits et de montures
Température d'application:	-60°C à +50 - 60°C sans traitement thermique
Mise en oeuvre:	À des températures entre 10°C et 40°C Tous les procédés de traitement d'usage
Particularités:	Excellent caractère physiologique Bonnes propriétés mécaniques Durcissement très rapide, même à basses températures
Adaptations spéciales:	L 285 T: rhéotrope L 285 W: teinte blanche

Laminating resin L 285 Hardener 500

Résine L 285 Durcisseur 500

Application

Low-viscosity laminating resin system not containing solvents or fillers, intended for processing and curing at room temperature. Suitable for production of parts with glass, carbon and aramide fiber reinforcements featuring high static and dynamic loadability.

The pot life is approx. 10 - 15 min. Laminating resin L 285 combined with hardener 500 is distinguished by very short curing times even at low temperatures (good curing is assured at temperatures starting at +10 °C). Non-tacky, high-gloss surfaces are obtained even with unfavorable curing conditions, such as lower temperatures or high relative humidity.

The mixing viscosities have been adjusted such that the resin will not run out of wide-meshed fabrics on vertical surfaces.

Thanks to their excellent adhesive properties, this system can also be used as adhesives for wood, metal, glass, concrete and numerous plastics. The thixotropic modification (e.g. laminating resin L 285 T) is to be preferred for thicker adhesive joints and vertical surfaces. Fillers (e.g. metal powder, talcum, cotton flakes, etc.) may be admixed to obtain special system properties.

Due to the elongation of 4-7%, which is advantageous for use as a laminating resin, the shear strength and peel resistance are somewhat lower than those of our special adhesive resins:

**Adhesive resin L 135 / K2 and
Adhesive resin A 10 / A 20.**

As a general rule applicable to all adhesives, thorough preparation of the intended adhesion surface is a fundamental prerequisite for good adhesion. Parting agent residue and contamination, such as dust, grease or water residue, will prevent effective bonding.

Système de résine pour stratifié, de faible viscosité et exempt de solvants et d'additifs, pour la mise en œuvre et le durcissement à température ambiante. Ce système permet de produire des composants, avec renforcement à fibres de carbone et d'aramide, possédant une charge statique et dynamique élevée.

Le temps d'utilisation se situe env. entre 10 et 15 minutes. La résine L 285 avec le durcisseur 500 se distingue par des temps de durcissement très rapides, même à des basses températures (très bon durcissement à partir de + 10°C). Même dans des conditions de durcissement désavantageuses (basses températures ou humidité de l'air élevée), on obtient des surfaces polies et non adhérentes.

Les viscosités de mélange ont été choisies de manière à empêcher, de manière sûre, toute fuite de résine lors de l'utilisation de tissus à larges mailles sur des surfaces verticales.

Grâce aux bonnes propriétés d'adhésion, ce système peut également être utilisé comme adhésif pour des matériaux tels que le bois, le métal, le verre, le béton et de nombreuses matières synthétiques. La formule thixotropique (par ex. résine L 285 T) convient en particulier pour des larges joints de collage et sur des surfaces verticales. L'utilisateur peut lui-même ajouter des additifs afin d'attribuer au système des propriétés spéciales (poudre métallique, talc, flocons de coton, etc.).

Les elongations avantageuses de 4 à 7% de l'application d'une résine pour stratifiés présentent cependant des résistances au cisaillement et au décollement légèrement inférieures à celles de nos

résines adhésives spéciales - type L 135/K2 et A 10/A 20.

Comme c'est le cas pour toutes les colles, le traitement préliminaire de la surface d'encollage est une condition primordiale pour assurer une bonne adhésion. Les résidus d'agent de démoulage ainsi que des souillures telles que poussière, graisse ou eau empêchent une bonne adhésion.



Ein Unternehmen der Borealis Gruppe

**Laminating resin L 285
Hardener 500**

**Résine L 285
Durcisseur 500**

Specifications

Spécifications

		Laminating resin L 285 Résine L 285
Density Densité	lbs/gal / 77°F g/cm ³ / 25°C	9,85 - 10,26 1,18 - 1,23
Viscosity Viscosité	cps / 77°F mPas / 25°C	600 - 900
Epoxide equivalent Équivalent époxy	-	165 - 170
Epoxide value Valeur EP	-	0,59 - 0,65
Colour Coloration selon	Gardner	max 3

		Hardener 500 Durcisseur 500
Density Densité	lbs/gal / 77°F g/cm ³ / 25°C	8,34 - 8,84 1,00 - 1,06
Viscosity Viscosité	cps / 77°F mPas / 25°C	200 - 350
Amine value indice d'amine	mg KOH / g	350 - 400
Colour Coloration selon	Gardner	max 5

**Laminating resin L 285
 Hardener 500**

**Résine L 285
 Durcisseur 500**

Processing details

Caractéristiques de mise en oeuvre

	Laminating resin L 285 Résine L 285	Hardener 500 Durcisseur 500
Average EP -Value Valeur moyenne EP	0,63	-
Average amine equivalent Équivalent moyen d'amine	-	62

Storage Stockage	>12 months in original containers >12 mois dans l'emballage d'origine
Processing temperature Température d'application	50 - 120 °F 10 - 50 °C
Temperature rise Montée de température	see diagram voir diagramme
Setting Durcissement	Curing at room temperature or curing in the mold at high temperatures Durcissement à température ambiante ou durcissement à chaud dans le moule
Heat treatment Traitement thermique	Not required- possible at 50 °C (120 °F) → 150 °C (300 °F) Non requis- au besoin entre 50 °C → 150 °C

Storage

The resins and hardeners can be stored for at least 12 months in their carefully sealed original containers. The resins and hardeners may crystallize at temperatures below +15°C (60°F). The crystallization is visible as a clouding or solidification of the contents of the container. Before processing, the crystallization must be removed by warming up. Slow warming up to approx. 50 - 60°C (120-140°F) in a water bath or oven and stirring or shaking will clarify the contents of the container without any loss of quality. Use only completely transparent products. Before warming up, open containers slightly to permit equalization of pressure. Caution during warm-up! Do not warm up over an open flame! While stirring up use safety equipment [gloves, eyeglasses, respirator].

Stockage

Les résines et durcisseurs peuvent être stockés dans leur emballage d'origine, bien fermé, pendant une durée minimale de 12 mois. Les résines et durcisseurs peuvent cristalliser à des températures inférieures à +15°C, reconnaissable à une consistance trouble ou une solidification du contenu du récipient. Avant la mise en oeuvre, il faut éliminer la cristallisation par réchauffement. Le réchauffement est éliminé, sans perte de qualité, en réchauffant lentement le produit à env. 50-60°C dans un bain marie ou au four et en agitant ou battant la substance. Traiter uniquement des produits entièrement transparents / Attention lors du réchauffement / Avant son réchauffement, ouvrir un peu le récipient afin de compenser la pression. Ne jamais réchauffer le récipient sur feu nu ! Porter des équipements de protection (lunettes et gants de protection, masque respiratoire) pendant l'agitation des produits réchauffés.

**Laminating resin L 285
Hardener 500**

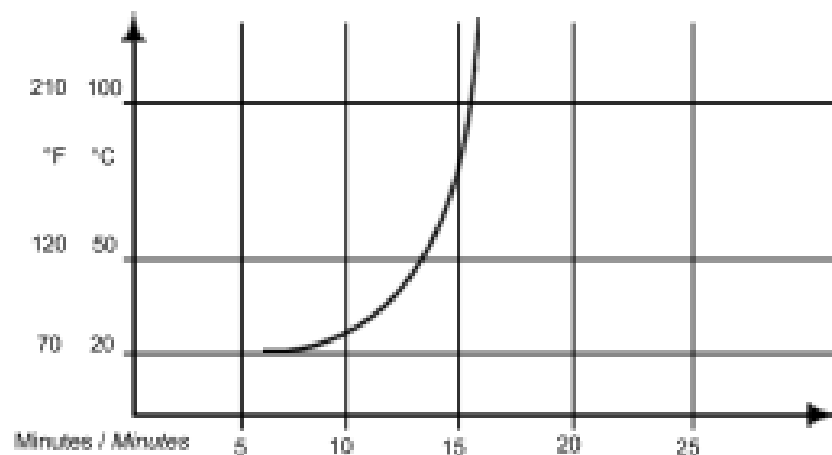
**Résine L 285
Durcisseur 500**

Temperature rise

Quantity: 100 g/20°C (70°F)

Montée en température

Quantité: (100g/20 °C)



The optimal processing temperature is in the range between 20 and 25°C (70-80°F). Higher processing temperatures are possible, but will shorten pot life. A rise in temperature of 10 °C (20°F) will halve the pot life. Water (for example very high humidity or contained in fillers) causes an acceleration of the resin/hardener reaction. Different temperatures and humidities during processing have no significant effect on the strength of the cured product.

Do not mix large quantities, especially from this highly reactive system. The heat flow from the mixing container is very low, so the contents will be warmed up very fast because of the reaction heat (exothermic resin-hardener reaction). This can cause temperatures >200°C (400°F) which may cause smoke intensive burning of the resin-hardener mixture.

La température de mise en oeuvre optimale se situe entre 20 et 25°C. Des températures supérieures sont possibles, mais elles réduisent le temps d'utilisation. Une augmentation de la température de mise en oeuvre de 10°C réduit le temps d'utilisation de moitié. L'eau (p. ex. une humidité de l'air très élevée ou des additifs humides) agit comme accélérateur pour la réaction résine/durcisseur. Cependant, des variations de température et de l'humidité de l'air pendant la mise en oeuvre n'ont pratiquement aucun effet sur la résistance du produit durci.

Avec des températures de mise en oeuvre supérieures, surtout pour des systèmes hautement réactifs, il est recommandé de ne pas mélanger de grandes quantités. La dissipation de chaleur hors du récipient de mélange étant très faible, la chaleur de réaction (réaction exothermique de résine/durcisseur) entraîne un réchauffement rapide du contenu du récipient. Les températures à l'intérieur du récipient peuvent dépasser 200°C et entraîner la carbonisation de la masse de résine avec une forte émission de fumée.

Gel time

Film thickness
1 mm
at different
temperatures

70 - 80°F 20 - 25°C	app. 45 - 60 min. env. 45 - 60 min.
105 - 119°F 40 - 45°C	app. 20 - 30 min. env. 20 - 30 min.

**Temps de
gélification**

Épaisseur de
couche 1 mm
à différentes
températures

**Laminating resin L 285
Hardener 500**

**Résine L 285
Durcisseur 500**

Mixture ratio

Rapports de mélange

	Resin L 285 : Hardener 500 Résines L 285 : Durcisseur 500
Parts by weight Parts de poids	100 : 40 +/-2
Parts by volume Parts de volume	100 : 50 +/-2

The specified mixing ratios must be observed as exactly as possible. Adding more or less hardener will not effect a faster or slower reaction - only incomplete curing which cannot be corrected in any way.

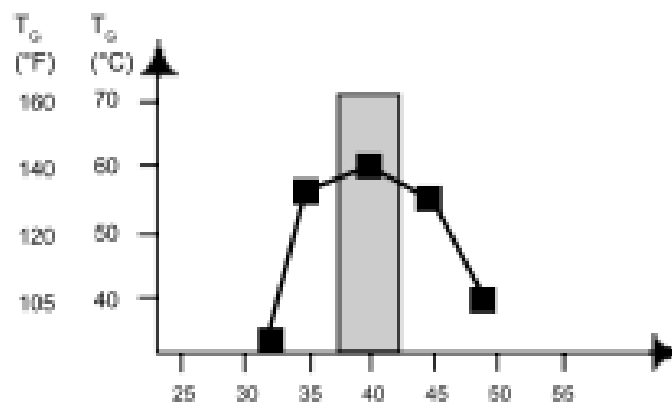
The mixture of resin and hardener must be mixed very thoroughly. Mix until no clouding is visible in the mixing container. Pay special attention to the walls and the bottom of the mixing container.

Les rapports de mélange indiqués doivent être observés. L'augmentation ou la réduction des parts de durcisseur n'entraîne en aucun cas une réaction plus rapide ou plus lente, mais uniquement un durcissement partiel du produit qui ne se laisse plus corriger, même par un post-traitement.

La résine et le durcisseur doivent être mélangés avec grande précaution. Dans le récipient, le mélange doit être exempt de stries. Prêter une attention particulière aux zones dans le fond et sur les parois du récipient de mélange.

**Mixing ratio ↔
glass transition temperature**

**Rapport de mélange ↔ Température de
transition vitreuse**



....Parts by weight of hardener 500 to
100 parts by weight of laminating resin L 285
Curing: 14 days at 35°C (80°F)

....Parts de poids du durcisseur 500 sur
100 parts de poids de résine L 285
Durcissement 14 jours à 25°C

**Laminating resin L 285
 Hardener 500**

**Résine L 285
 Durcisseur 500**

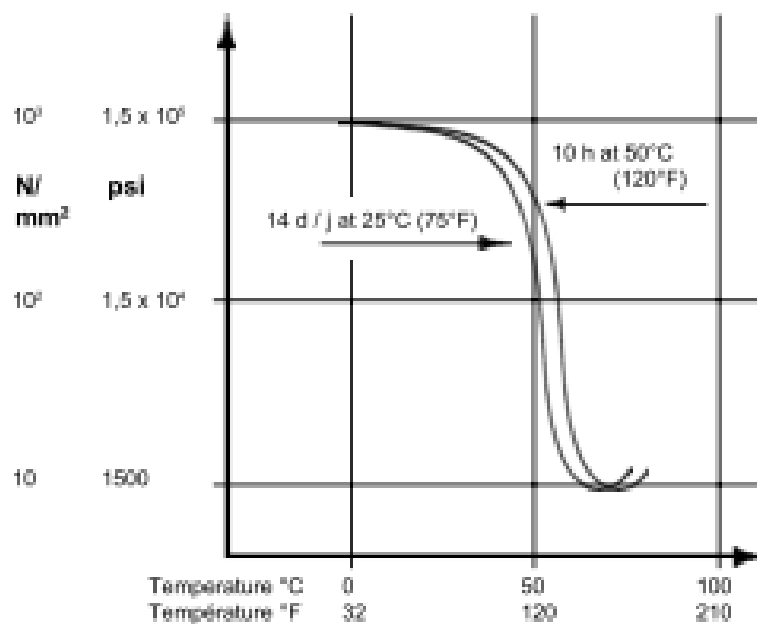
Laminating resin L 285 - Hardener 500 <i>Résin L 285 - Durcisseur 500</i>	
Max T_c for curing at 18°C (65°F) <i>Max T_c à 18°C durcissement</i>	100 - 110°F 40 - 45°C
Max T_c for curing at 25°C (80°F) <i>Max T_c à 25°C durcissement</i>	120 - 150°F 50 - 60°C
Max T_c for heat treatment at 50°C (120°F) <i>Max T_c à 50°C traitement thermique</i>	140 - 150°F 60 - 65°C

DSC DIN 51007

DSC DIN 51007

Modulus of rigidity DIN 53445

Module d'élasticité DIN 53445



PŘÍLOHA 2: TECHNICKÝ INFORMAČNÍ LIST NORPOL 420-100

Technický informační list NORPOL 420-100

POPIS

NORPOL 420-100 je středně reaktivní, orthofthalová polyesterová pryskyčice pro injekční vstřikování.
NORPOL 420-100 neobsahuje urychlovač a není thixotropizována.

FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI V KAPALNÉM STAVU PŘI 23°C

Vlastnost	Hodnota	Jednotka	Zkušební metoda
Viskozita			
-Kusfel-Deska	180-210	mPa.s(cP)	ISO 2884-1974
Hustota	1,10	g/cm ³	ISO 2811-1974
Číslo kyselosti	22	mg KOH/g	ISO 2114-1974
Obsah styrenu	43±2	% hm.	-
Bod vzplanutí	34	°C	ASTM D 3278-73
Doba setrvalosti:			
-1% Norpol 1			
-1% Co urychlovač(1%)	20-30	min.	-
Stádovatelnost	6	měsíce při teplotě do 23°C	

VLASTNOSTI VÝROBKU VE VYTVRZENÉM STAVU

Vlastnost	Čistá pryč.	Skleněná rohož		Jednotka	Zkušební metoda
Obsah skla	-	25-35	35-40	% hm.	ISO 1172-1975
Pevnost v tahu	70	110	160	MPa	ISO 527-1993
E-modul v tahu	3700	8000	10300	MPa	ISO 527-1993
Protažení	3,5	2,0	2,2	%	ISO 527-1993
Tvarová stálost za tepla	67	-	-	°C	ISO 75 -1993
Pevnost v ohybu	140	155	215	MPa	ISO 178-1993
E-modul v ohybu	3600	7200	10000	MPa	ISO 178-1993
Rázněná houčivost	12	-	-	ml/mm ²	ISO 179-1992

Hodnoty uvedené v tabulce byly dosaženy na laminátu vystuženém standardní práškové pojivou s křehčí, ruční laminací aby se dosáhlo hodnot, srovnatelných s ostatními typy polyesterových pryskyčic.

Bezpečnostní údaje

Vše je uvedeno v Bezpečnostním listě, se kterým je nutno se před prvním použitím výrobku seznámit.

Ornačení nebezpečí

Nenasycené polyesterové pryskyčice jsou označovány jako **X_n** – Zdraví škodlivý.

POZNÁMKA

Údaje v tomto informačním listu byly získány laboratorními zkouškami v technickém odboru Jotun Polymer A/S
Všechny grafy jsou na bázi průběhových hodnot z vzájemně příslušné 1976

Uvedené informace jsou podle našeho nejlepšího vědomí správné a mají sloužit jako vodítko pro uživatele,
nezakládají však žádnou právní zodpovědnost.